

Perttu Heikkilä

Ajoneuvo litium-ioni akkupaketin käyttöönotto

Sähkötekniikan korkeakoulu

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 20.5.2015.

Työn valvoja:

Prof. Arto Visala

Työn ohjaaja:

DI Teemu Lehmuspelto

Tekijä: Perttu Heikkilä		
Työn nimi: Ajoneuvo litium-ioni akkupaketin käyttöönotto		
Päivämäärä: 20.5.2015	Kieli: Suomi	Sivumäärä:7+69
Sähkötekniikan ja automaation laitos		
Professori: Automaatiotekniikka		Koodi: AS-84
Valvoja: Prof. Arto Visala		
Ohjaaja: DI Teemu Lehmuspelto		
<p>Diplomityössä käyttöönotettiin litium-ioni akkupaketti ja tutkittiin akkupaketin akunhallintajärjestelmän toimintaa. Diplomityö käsittää lyhyen selvityksen litium-ioni akuista sekä akunhallintajärjestelmistä. Akkujen yleiset ominaisuudet käydään läpi. Yleisimmät litium-ioni akkukemiat käsitellään. Yksi akkujen mahdollinen kehityspolku esitellään. Akunhallintajärjestelmien toiminnallisuutta ja topologioita esitellään. Työssä otettiin käyttöön ominaisjännitteeltään 363 voltin ja 40 Ah:n kokoinen litium-ioni akkupaketti, mikä on varustettu Elithion Lithiumate-akunhallintajärjestelmällä ja tarpeellisella akkuelektroniikalla. Akkupaketin kennot ovat Kokamin valmistamia 40 Ah:n litium-nikkeli-mangaani-koboltti-oksidi (NMC) kennoja. Käyttöönoton sekä kokeellisen tarkastelun mahdollistamiseksi työssä koottiin kaksi lataus- ja purkulaitteistoa. Akkupaketin käyttöönottamisen vaiheet olivat: ohjelmointi, konfigurointi, i/o testaus ja kytkeminen kuormaan. Laitteistoilla tehtiin esibalansointi sekä validointitestit akkupaketille. Validointitestit koostuivat tasavirta lataus ja -purku testeistä, dynaamisista kuormitustesteistä ja syklitesteistä. Testit kartuttivat käytännön kokemusta käyttöönoton haasteista. Mittauksissa havaittiin jännitteen ja virran mittausten olevan spesifikaation mukaisia. Akkukennojen kapasiteetit todettiin spesifikaatiota suuremmiksi. Lämpötilan havaittiin nousevan nopeasti ja jäähtyvän hitaasti. Akunhallintajärjestelmän estimaattien ja vikatilojen vaikutuksista toisiinsa saatiin useita havain-toja. Estimaattien tarkkuuksista ja toiminnasta saatiin alustavia tuloksia. Akun käyttökokemukset rajoittuvat HIL-testauksen kaltaiseen laboratoriotestaukseen. Testien osalta voidaan todeta akkupaketin soveltuvan käytettäväksi työkoneessa, mittauksissa todetuin rajoituksin.</p>		
Avainsanat: Litium-ioni, Li-Ion, BMS, Akunhallintajärjestelmä, Akkujen hallin-tajärjestelmä, Akkukennojen hallintajärjestelmä, Akkupaketti		

Author: Perttu Heikkilä

Title: Mobilization of the vehicle lithium-ion battery pack

Date: 20.5.2015

Language: Finnish

Number of pages:7+69

Department of Electrical Engineering and Automation

Professorship: Automation Technology

Code: AS-84

Supervisor: D.Sc. Arto Visala

Instructor: Tech. Teemu Lehmuspelto

At the thesis, a lithium-ion battery pack was commissioned and working principle of a battery management system were researched. The thesis consist of short study about lithium-ion batteries and battery management systems. The general features of lithium-ion batteries will be gone through. The range of lithium-ion batteries in the markets will be gone through. A possible development path of lithium-ion batteries will be dealt with. Functionalities and topologies of battery management systems will be presented. During the work, a lithium-ion battery pack was commissioned with was equipped an Elithion Lithiumate-battery management system and necessary battery electronics. The battery pack nominal voltage is about 363 volts and capacity is 40 ampere-hours. Battery cells are lithium-nickel-manganese-cobolt-oxide (NMC) chemistry manufactured by Kokam. Two charging and discharging instrumentations were built for commission and test purpose of the battery pack during the work. The stages of the commissioning were: program, configure, i/o testing, anchorage to load. Pre-balancing and staged validate-tests were made for the battery pack. The validate-tests includes direct current charge and -discharge tests, dynamic loading tests and cycle tests. The output of tests got much empirical experience about implementation challenges. At the measurements, values of voltages and current were pointed out to meet it's specifications. The capacities of the battery cells found higher than specification's values. Temperature discovered heating up quickly and cooling down slowly. The influences of the fault states against the estimates of the battery management system got many observations. About accuracy and behavior of the estimates got preliminary results. The user experience was limited at HIL-testing in the lab. In according to measurements done, the battery pack found suitable to use at a workmachine defined limitations.

Keywords: Lithium-ion, Li-Ion, BMS, Battery Management System, battery pack

Esipuhe

Diplomityön ohjeelliseksi laajuudeksi on määritetty 30 opintopistettä. Tämä tarkoittaisi yhtäjaksoisesti neljän ja puolen kuukauden mittaista työjaksoa. Tämän työn tekeminen kesti 45 kuukautta. Työn viivästymiseen syitä on turha jäädä murehtimaan. Merkityksellisempää on työn aikana syntynyt mielikuva kuinka diplomityö tehdään määrääjässä. Diplomityöprosessin kautta koen olevani valmiimpi työelämän haasteisiin.

Lopputyöni aikana useat henkilöt ovat antaneet tukensa työni onnistumisen eteen. Kiitän Professori Jussi Suomelaa työn valvonnasta sekä mahdollisuudesta lopputyön tekemiseen sähköisen ajovoimansiirron tutkimusryhmään. Kiitän Professori Arto Visalaa tuesta työn loppumetreillä. Kiitän Teemu Lehmuspeltoa työn ohjauksesta sekä työtä edistävästä toimista. Kiitän Ari Hentusta akkuihin ja tehoelektroniikkaan liittyvistä kehittävästä keskusteluista.

Olen työn aikana saanut runsaasti tukea ja ohjausta myös sisaruksilta sekä ystäviltä. Loppumetreillä erityisesti Arttu ja Jarkko pitivät liekkiä yllä. Tsemppauksen sekä lyhyidenkään aiheesta käytyjen keskustelujen merkitystä ei voi väheksyä. Kaikki on ollut kantamassa ja rakentamassa työtä eteenpäin. Kiitos tuesta!

Otaniemi, 20.5.2015

Perttu Heikkilä

Sisältö

Tiivistelmä	ii
Tiivistelmä (englanniksi)	iii
Esipuhe	iv
Sisällysluettelo	v
Lyhenteet	vii
1 Johdanto	1
2 Litium-ioni akkutekniikka	3
2.1 Alkuaine litium	3
2.2 Litium-akkujen historia	3
2.3 Toimintaperiaate	4
2.4 Litium-metalli akku	6
2.5 Litium-ioni kemiat	6
2.5.1 Anodimateriaalit	6
2.5.2 Katodimateriaalit	7
2.6 Litium-akkujen kehitysnäkymät	10
2.7 Ominaisuudet	12
2.7.1 Sisäinen impedanssi	12
2.7.2 Mallintaminen	13
2.7.3 Ikääntyminen	15
2.7.4 Turvallisuus	16
2.8 Kennot ja kytkennät	18
2.8.1 Kennorakenteet	18
2.8.2 Kytkentätavat	19
3 BMS - Akunhallintajärjestelmä	21
3.1 Toiminnot	21
3.1.1 Mittaus	21
3.1.2 Hallinta	23
3.1.3 Evaluointi	29
3.1.4 Kommunikaatio	30
3.1.5 Lokikirjaus	30
3.2 Topologiat	30
4 Tutkimuslaitteisto ja -menetelmät	32
4.1 Laboratorio testilaitteisto	32
4.1.1 Elithion BMS	32
4.1.2 Akkupaketti	32
4.1.3 Elithion mittaukset ja vertailuestimaatit	36
4.2 Tutkimusmenetelmät	38

4.2.1	BMS Käyttöönotto	38
4.2.2	Akkupaketin validointitestit	39
5	Käyttöönotto ja mittaukset	41
5.1	Akuston lataus- sekä testilaitteisto	41
5.1.1	Latauslaitteisto	43
5.1.2	Lataus- ja kuormituslaitteisto	43
5.2	Mittaukset	46
5.2.1	BMS käyttöönotto	46
5.2.2	Akkupaketin validointitestit	49
6	Pohdinta	54
6.1	Käyttöönotto	54
6.2	Mittaukset	54
7	Johtopäätökset	57
A	Akkupaketin kytkentäkaavio	64
B	Lohkokaavio akun käyttämisestä	65
C	Controldesk ohjausnäkymä	66
D	Controldesk mittausnäkymä	67
E	Simulink rakenne	68
F	Akkumoduulin balansointikortti	69

Lyhenteet

CCCV	Constant Current Constant Voltage
CCL	Charge Current Limit
CAN	Controller Area Network
LIN	Local Interconnect Network
ECU	Electronic Control Unit
RTI	Real-Time-Interface
PWM	Pulse Width Modulation
SOC	State Of Charge, akun varaustaso suhteessa täyteen akkuun (%)
SOH	State Of Health, akun terveystila suhteessa uuteen spesifikaation mukaiseen akkuun (%)
DOD	Depth Of Discharge, purkusyvyys on estimaatti akusta puretusta energiasta suhteessa akun nimelliseen kapasiteettiin (Ah)
NHE	Normal Hydrogen Electrode
SEI	Solid Electrolyte Interphase, Akun elektrodin sekä elektrolyytin väliin muodostuva välikerros
HVFE	High Voltage Front End - Lithiumate ohjaimen laajennuslevy

1 Johdanto

Ajoneuvotekniikan laboratoriossa alkoi vuonna 2010 eStorage-akututkimushanke. eStoragea seurasi jatkotutkimushankkeena eStorage2. Tutkimusprojektit kuuluvat ECV tutkimushankkeeseen. ECV eli "Electric Commercial Vehicles" on yritysten ja yritysryhmien muodostama julkinen yhteisrahoitteinen tutkimusprojekti. ECV:llä on useita hankkeita, mitkä jakautuvat kolmen pääteeman alle: (1) Sähkön varastointi ja akustot, (2) ajoneuvot, koneet ja niiden voimalinja sekä (3) ajoneuvojen ja liikkuvien koneiden järjestelmät ja lataus. ECV hankkeen mielenkiinnon kohteina ovat ajoneuvojen ja raskaiden ajoneuvojen sähköistäminen, sen osaamisen vahvistaminen ja liiketoiminnan kehittäminen.

eStorage-hankkeissa selvitetään energiavarastojen kapasiteettiin ja ominaisuuksiin liittyviä seikkoja. Toisekseen selvitetään sähköajoneuvojen ja työkoneiden tutkimusta ja kehitystä. Kolmantena asiana selvitetään alan standardointia ja kehityssuuntia.

eStorage2-hankkeen tavoitteina on avustaa yritysten tutkimusta ja tuotekehitystä sekä synnyttää ja ylläpitää tutkimusta. Akkuteknologiaan liittyy vaatimukset jäädyttämisestä, lämmittämisestä ja akkujen hallinnasta. EStorage2:n tavoitteina on tuottaa tietoa näidenkin aiheiden tiimoilta.

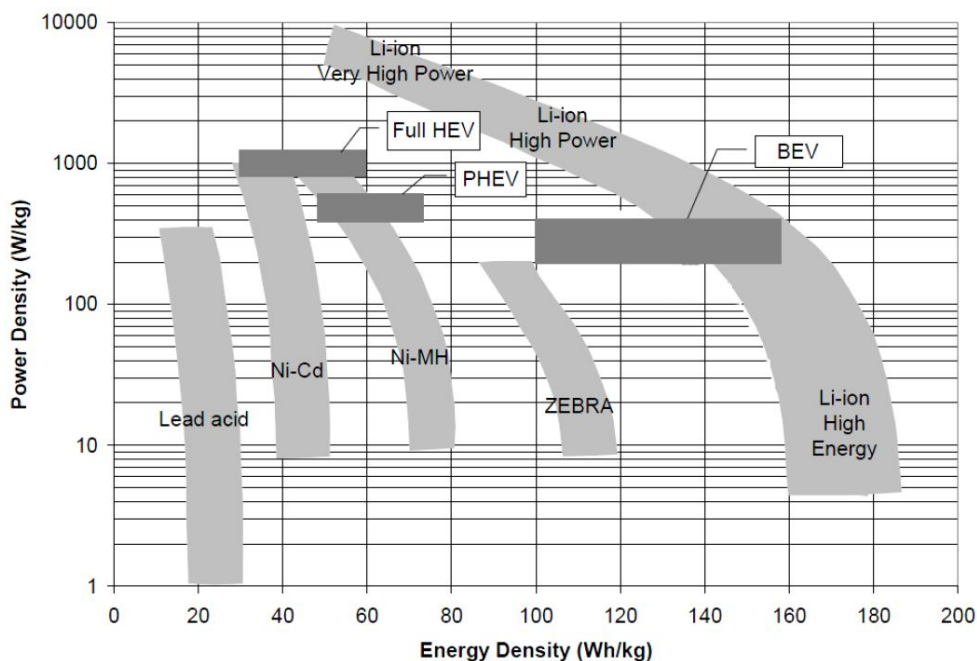
eStorage-hankkeiden aikoina laboratoriolle hankittiin Kokam Co:n valmistamia litium-nikkeli-mangaani-koboltti-oksidi (NMC) akkukennoja. Kennoille suunniteltiin paketoitua ja se valmistui yhtenä eStoragen tuotoksista.

Markkinoilla olevista akuista Litium-ioni akut ovat ylivoimaisia teho- ja energiatihedeltänsä verrattuna (Kuva 1). Litium-ioni akkujen valjastaminen vaativiin sovelluskohteisiin, kuten ilmailualalle vaatii vielä kehitystä akkujen luotettavuudessa. Akkujen käyttöturvallisuuden ja käytönaikaisen seurannan avuksi on kehitetty akunhallintajärjestelmiä.

Sähköajoneuvojen yleistymisen myötä kokemusperäinen tieto sähköajoneuvoista on lisääntynyt myös muiden kuin tutkijoiden joukossa. Suomenkin maaperällä sähkö- ja hybridi ajoneuvot ovat jo pitkään olleet mukana tieliikenteessä. Myös sähköistetyt tai osin sähköistetyt työkoneet ovat lisääntyneet. Lisäksi on lukematon määrä pienenlektronisia sovelluksia mitkä saavat virtansa litium-ioni kennoista. Paljosta kokemuksesta huolimatta, julkaistua tutkimustietoa litium-ioni akkutekniikan käyttöönoton vaiheista on vähän.

Miten Litium-ioni akkupaketin käyttöönotto tulisi toteuttaa? Mikä on akkuelektroniikan merkitys litium-ioni akulle? Mitä ovat vaadittavat ominaisuudet akunhallintajärjestelmältä, akkupaketilta, akkukemialta suhteessa sovelluksen käyttöön?

Työssä otetaan käyttöön litium-ioni akkupaketti sekä selvitetään akuston soveltuvuutta todellisen mukaisessa käytössä erilaisin testein. Työssä suunnitellaan akku-



Kuva 1: Akkutekniikoita vertailtu energia- ja tehotiheyden perusteella. [16]

paketin lataamista ja kuormittamista varten soveltuvat testilaitteistot.

Työn teoria katsauksessa käsitellään yleisimmät litium-ioni kemiat. Akunhallintajärjestelmien toiminnallinen kuvaus pääosin kirjan ”Battery management systems” (Davide Andrea, 2011) mukaisesti. Testauslaitteistot tehdään osin olemassa olevan dSpace-reaaliaika ympäristön yhteyteen. Laitteiston valmistamisessa hyödynnetään valmiita laitekomponentteja, missä suunnittelu, kaapeloinnit, kytkennät ja käyttöönotto ovat työssä tehtäviä asioita. Akkupakettia testataan tasavirroilla, muuttuvilla virroilla sekä työkonesykliillä.

Diplomityö koostuu kahdesta teoriaosuudesta. Ensimmäisessä käydään läpi litium-ioni akut. Toisessa käydään läpi akunhallintajärjestelmät. Kolmannessa luvussa esitellään työssä käytetyt laitteet sekä testejä varten valmistetut testilaitteistot. Neljännessä luvussa kuvaillaan käyttöönottamisen vaiheet ja esitellään tulokset. Viimeisessä luvussa keskitytään tuloksien analysointiin sekä esitetään kehitysehdotukset.

2 Litium-ioni akkutekniikka

2.1 Alkuaine litium

Litium on alkalimetalli, mikä kuuluu jaksollisen järjestelmän 1.ryhmään. Litiumin järjestysluku on kolme, joten sillä on kolme elektronia ulkokehällään. Litium on veitsellä leikattavan pehmeää ja väriltään hopeisen vaaleanharmaata. Litium on kevyin sekä lisäksi tiheydeltään pienin ($0,534 \text{ g/cm}^3$) kaikista metallimaisista alkuaineista. Litiumin lämpökapasiteetti on korkein muista kiinteänä esiintyvistä alkuaineista. Litium on erittäin reaktiivinen aine puhtaana alkuaineena. Jo huonelämpötilassa litium reagoi ilman hapen ja typen kanssa [1]. Kaikkien muiden ominaispiirteittensä lisäksi litiumilla on kaksi arvoa, jotka tekevät siitä niin merkittävän akkusovelluksissa. Ensimmäinen näistä on suurin mahdollinen sähkökemiallinen potentiaali ($E_0 = -3,045 \text{ V/NHE}$) standardi elektrodi potentiaali - taulukon mukaan. Ero on suuri muihin akkukemioihin verraten. Esimerkiksi lyijyllä vastaava potentiaali on $-0,126 \text{ V/NHE}$ ja nikkelillä $-0,236 \text{ V/NHE}$ [2]. Toinen on litiumin varauskyky: 3860 mAh/g [3]. Varauskyky on laskettu ainemäärien ja vapaiden elektrodien suhteesta ja sitä voidaan pitää energiatheyden teoreettisena maksimina. NykYTEKniikalla ei kyetä pääsemään näin korkeisiin energiatheyksiin.

Litiumia hyödynnetään useissa sovelluksissa. Akkujen lisäksi metalliseoksissa, lämmönsiirtimissä, kemianteollisuudessa, lääkkeiden valmistuksessa, voiteluaineissa ja lasikeramiikassa. [1]

2.2 Litium-akkujen historia

Ensimmäinen huomionarvoinen litium akkututkimus tehtiin vuonna 1912, kun G.N. Lewis tutki happo-emäs pareja valmistamansa litium-pariston avulla. Litium tutkimus sai alkunsa ja 70-luvulla markkinoille tuotiin ensimmäinen litium akku.

Ennen akkuja valmistettiin paristoja, missä oli litium-metalli negatiivisena elektrodina sekä kiinteä elektrolyytti. 1973 Matsushita kehitti litium-hiilimonofluoridi (LiCFx) pariston. 1975 Sanyo toi markkinoille litium-mangaanidioksidi (LiMnO_2) pariston. Paristot soveltuivat käytettäväksi pienten sovellusten, kuten ledivalojen ja kameroiden virtalähteinä. Litium-paristoista haluttiin kehittää ladattavia malleja-akkuja. Tutkimus keskittyikin pääosin positiivisten elektrodien epäorgaanisiin yhdisteisiin 70- ja 80-luvulla. Johtavia polymeerimateriaaleja kehitettiin käytettäväksi molemmilla elektrodeilla. Vettä kevyempänä polymeeri ei tuonut kuitenkaan lisähyötyä nappiparistoja suuremmissa akuissa. Ensimmäisissä ladattavissa litiumakuissa oli jatkuvana ongelmana turvallisuus. Latauksen aikana litium-metallielektrodille muodostui haarakkeita ja pulverimaisia pesäkkeitä. Erilaisista seosmateriaaleista etsittiin ratkaisua tähän turvallisuusongelmaan. Tadiran kehitti -89 dioksolaanipohjaisen elektrolyytin, mistä muodostui polymeeriä 110°C -asteessa. Polymeerin resistanssi oli niin suuri että se katkaisi kennoreaktiot ja näin lämpökarkauksen. Litium-metalliakut eivät koskaan tehneet läpimurtoa ratkaisemattoman epävakau-

den vuoksi. Pienissä paristoissa litium-metallia käytetään yhä. Käänte alalla nähtiin kun keksittiin valmistaa negatiivinen elektrodi litiumyhdisteistä.

Koko 80-luvun litium-metalliakkujen rinnalla kehitettiin elektrodimateriaalia, missä litium on sitoutuneena elektrodin välikerrokseen. Nämä välikerrosmateriaalit koostuvat kerrostuneista molekyylitasoista. Molekyylikerrosten väliin, välikerrokseen, jää tilaa litiumioneille. Välikerrosmateriaaleilla ei ole litium-metalli akun metallisen litiumelektrodin uudelleen muodostumisongelmaa akun purkamisen ja latauksen yhteydessä. Välikerroselektrodeilla vain litiumionien määrä kerrosten välissä muuttuu.

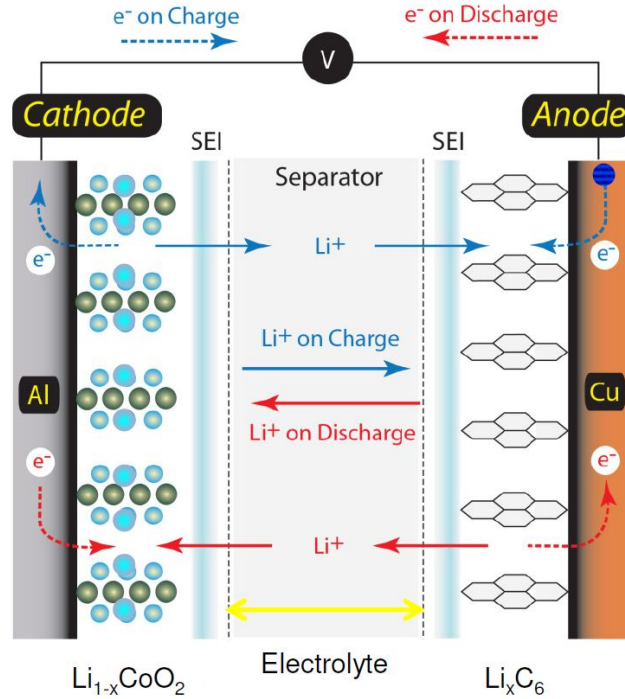
Ensin Goodenough patentoi LiCoO_2 välikerrosmateriaalin positiivisena elektrodina 1980 [4]. Vuoden päästä Ikeda patentoi ensimmäisen välikerrosmateriaalin negatiivisena elektrodina, missä orgaanisena yhdisteenä oli grafiitti [5]. Basu havaitsi litiumin kerrostuvan grafiittiin sulan suolan elektrolyytin ja korkean lämpötilan vaikutuksen alla [6]. 1985 Yoshinon tutkimusryhmä kehitti akkutyypin, missä negatiivinen elektrodi on välikerroshiili ja positiivinen elektrodi litiumkobohttioksididi [7]. Ensimmäinen kaupallinen akku tuli Sonyltä 1991. Sonyn käyttämä kauppanimi Li-Ion muodostui käsitteeksi, mistä litium-ioni akut tunnetaan nykypäivänäkkin. Sonyn akut olivat LiMnO_2 kemialla ja perustuivat Asahin patenteihin. Akussa oli polymeeri-elektrolyytti-separaattori estämässä lämpökarkausta. Sony toi markkinoille myös elektronisen suojauspiirin kennon sisäisen paineen hallitsemiseksi. Piiri sulki lataus- tai purkuvirran, jos kennon sisäinen paine kasvoi liian suureksi. Muutkin yhtiöt toivat akkujansa markkinoille patenttisuojausten rajoissa. Li-Ion akuissa oli päästy turvallisuudessa selkeä askel eteenpäin verrattuna litiummetalli-akkuihin.[8]

2.3 Toimintaperiaate

Litium-ioni akussa varausta kantavat litiumionit kulkevat katodi ja anodi elektrodien välillä (Kuva 2). Akkukkenno rakentuu neljästä perusosasta: positiivisesta elektrodista, negatiivisesta elektrodista, elektrolyytistä sekä separaattorista. Elektrodeista käytetään, niillä tapahtuvan reaktion mukaan, usein vain nimityksiä katodi tai anodi. Katodilla tapahtuu pelkistyminen, eli hapetusluvun pieneneminen. Anodilla tapahtuu hapettuminen, eli hapetusluvun kasvaminen.

Hapetusluvun kasvamisen voidaan ajatella tarkoittavan, että yhdiste reagoidessaan luovuttaa elektronin. Akun toiminnassa onkin kyse hapetus-pelkistys reaktioista. Elektrodit, positiivinen ja negatiivinen, muodostavat sähkökemiallisen parin. Akun purkautuessa negatiivisella elektrodilla litium hapettuu. Vapautunut elektroni kulkee ulkoisen virtapiirin kautta positiiviselle elektrodille. Samanaikaisesti litiumioni siirtyy elektrolyytin välityksellä negatiiviselle elektrodille, missä ioni vastaavasti pelkistyy litiumiksi sitoutuen elektrodimateriaalin kanssa.

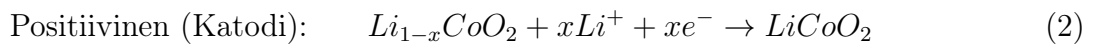
Акun purkautumiseen liitetty sana ensiöpiiri tarkoittaa sähkökemiallisen parin luonnollista reaktiosuuntaa. Toisiopiiri tarkoittaa vastaavasti latausreaktiota. Toisiopiiri muodostuu kun akun napoihin kytketään ulkoinen sähkökemiallista potentiaalia



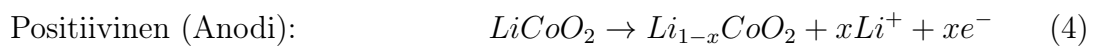
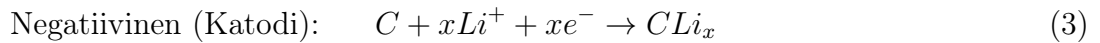
Kuva 2: Litium-ioni akun toimintaperiaate [59].

suurempi potentiaali, jolloin sähkökemiallisen parin luonnollinen reaktio tapahtuu vastakkaiseen suuntaan. Latauksen yhteydessä huomataan anodin ja katodin vaihtavan paikkaa, jolloin siis hapettuminen ja pelkistyminen tapahtuvat vastakkaisilla elektrodeilla. Kaavoissa 1-5 on esitetty LiCoO_2 -akun reaktiot. [8][9]

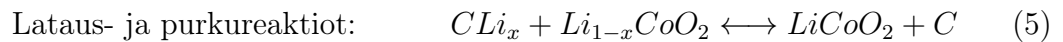
Ensiöreaktio:



Toisioreaktio:



Kokonaisreaktiot:



, missä ensiöreaktion suunta oikealle ja toisioreaktion suunta vasemmalle. Kaavoissa C ja CoO_2 kuvaavat negatiivista ja positiivista elektrodia. [9]

Akun navat käsittävät kollektorin ja elektrodin. Kollektoreina käytetään keveitä sekä

hyvällä sähkönjohtavuudella varustettuja metalleita, tyypillisesti alumiinia ja kuparia. Metalli ei saa reagoida elektrodin kanssa. Alumiini on kevyt, mutta reaktiivinen litiumin kanssa. Näin ollen tyypillisesti negatiivinen napa on kuparia ja positiivinen napa alumiinia. Kollektori avustaa elektronien kulkeutumisen ulkoisesta sähköpiiristä elektroleille asti. Elektrodimateriaalit vaihtelevat litium-ioni akkutyypin mukaan. Yhteistä elektrodimateriaaleille on välikerrosmainen rakenne. [10][11]

Elektrolyytin kautta ionit kulkevat elektroleiden välillä. Huomattavaa on, että vapaat elektronit eivät kykene kulkemaan elektrolyytin läpi. Elektrolyytti voi olla nestettä, litiumsuolaa, geeliä, polymeeriä tai kiinteätä. [12]

Separaattori on huokoinen kalvo, mikä sijaitsee sähköparin välissä. Separaattori erottaa positiivisen ja negatiivisen elektrodin toisistaan. Separaattori on kyllästetty elektrolyyttiin. Nestemäisen elektrolyytin ollessa kyseessä separaattori on vaahtomuovimaista materiaalia. Materiaaliin kostutettuna nestemäinen elektrolyytti pysyy paikallansa. [12]

2.4 Litium-metalli akku

Litium-metalli akku on kuten litium-ioni akku, mutta sen negatiivinen elektrodi koostuu täysin litiumista. Positiivisena elektrodina käytetään välikerrosmateriaaleja.

Teoreettisesti litium-metalli akku on suorituskykyisin litium-pohjainen akku. Litiumin käytöllä saavutetaan korkein kennojäännite sekä korkein energiatiheys. Materiaalit, joissa aktiivisen litiumin määrä on vähäisempi, jäävät puhtaan litium-metallin suorituskyvystä. Näin ollen litium-metalli akuilla on teoriassa mahdollisuus saavuttaa suurin teho- ja energiatiheys litium-pohjaisista akuista. [9]

Litium-metalli akkujen kehitys laantui epävakaus ja sen myötä turvallisuusongelmiin 80-luvun lopulla. Akun taipumuksena on muodostaa välihaarakkeita ja paikallisia pulveripesäkkeitä litiumin pintaan latauksen aikana. Seurauksena on usein epävakautta tai akun tuhoutuminen lämpökarkauksen kautta. Litium-metalli akuissa on edelleen ratkaisemattomia turvallisuus- ja ikääntymisongelmia.

Nykyiseltä suorituskykytasoltaan litium-metallit ovat vastaavia litium-ioneja hiukan jäljessä energia- ja tehosiheydeltänsä verrattuna. Litium-metalli akkuja on pitkään kehittänyt kanadalainen Avestor. Avestor yhdistyi ranskalaisen yhtiön kanssa ja tunnetaan nykyisin nimellä Bolloré Group. [8][13]

2.5 Litium-ioni kemiat

2.5.1 Anodimateriaalit

Litium-ioni akkujen alkuvaiheissa käytettiin koksia, kovaa hiiltä, akun negatiivisena elektrodina. Myöhemmin grafiitti korvasi koksen. Nykyisin vaihtoehtoja on useita,

kuten kova ja pehmeä hiili, akun anodimateriaaliksi. Grafiitti on hiiltä kuten koksikin, mutta koksen kiderakenne ei ole niin järjestynyt kuin grafiitilla. Grafiitin käyttö on perusteltua; se on suhteellisen halpaa ja sillä saadaan akulle korkea sekä vakaa- na pysyvä jännite. Grafiitin heikkoutena on turvallisuus. Grafiitti ei syty helposti, mutta leimahtaessaan palaa hyvin. Toiseksi litium saostuu herkästi grafiitin pinnalle. Saostuminen johtaa nopeasti tulipaloon. Litiumin saostumisen selittää grafiitin matala potentiaali. Jo 0,05 V ylitys kennojännitteessä aiheuttaa litiummetallin saostumista. [14] Grafiitti reagoi elektrolyytin kanssa. Grafiitin pintaan muodostuu SEI-kerros (Solid Electrolyte Interphase). SEI-kerros estää lisäreaktioiden tapahtumisen grafiitin ja elektrolyytin välillä. [8][15]

Litiumtitanaatti anodimateriaalina on selvästi turvallisempi vaihtoehto grafiittiin verrattuna. Litiumtitanaatin sähkökemiallinen potentiaali on 1,55 V korkeampi kuin litiummetallin saostumispotentiaali. Tämän takia litiumin saostumista titanaatin pintaan ei juurikaan tapahdu. Litium ei myöskään pala kuten grafiitti. Litiumtitanaatti sallii suuret lataus- ja purkausvirrat. Ikääntymisen puolesta litiumtitanaatti on edistyksellinen. Titanaatti ei reagoi elektrolyytin kanssa kuten grafiitti, eikä täten muodosta SEI-kerrosta. Litiumtitanaatti ei laajene eikä supistu käytön yhteydessä. Litiumionit mahtuvat litiumtitanaatti-hilaan niin hyvin ettei kiderakennetta väsyttävää tilavuuden muutosta tapahdu. [14] Korkean potentiaalinsa vuoksi akkukennon jännite jää matalaksi ja näin myös energiatiheys. Käytännön kapasiteetti on luokkaa 175 mAh/g. Grafiittiin verrattuna titanaattianodi on kalliimpi. Korkeissa lämpötiloissa anodilla on taipumusta reagoida elektrolyytin kanssa aiheuttaen vakausongelmia. Kaikkien ominaisuuksiensa puolesta litiumtitanaatti on turvallinen sekä pitkäikäinen akun elektrodimateriaalina käytettäväksi. [16] Litiumtitanaatti pohjaisia akkuja valmistaa tällä hetkellä Altairnano sekä Toshiba. [17][18]

Kehitystyön alla ovat silikonipohjaiset saostumiseen perustuvat anodit. Teoreettinen kapasiteetti on 4200 mAh/g ollen näin 10-kertainen välikerrosanodeihin nähden. 2010-luvulla Panasonic on tuonut oman silikonigrafiitti anodipohjaisen litium-ioni sormiparistonsa markkinoille. Paristolle luvattiin noin 1100 mAh/g energiatiheys sekä eliniäksi 500 lataus-purkusykliä. Suurin ongelma silikonipohjaisella anodilla on saostumisen aikana tapahtuva suuri tilavuuden muutos (n.300 %). [16]

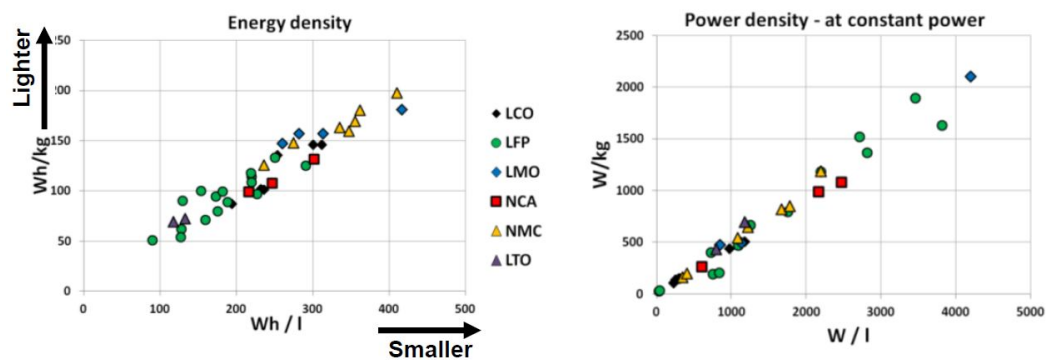
2.5.2 Katodimateriaalit

Useimmat litium-ioni katodit perustuvat metallioksidin, kuten ensimmäisenä litium-ioni akkuna patentoitu litium-kobolttioksidi. Litium-kobolttioksidin epävakautta ei ole riittävällä tavalla pystytty poistamaan pitkänkään kehitystyön tuloksena. Litium-kobolttioksidin epävakautta on pyritty kompensoimaan lisäaineistamalla tai täysin korvaamalla koboltti katodimateriaalina. Lisäaineistus katodeita ovat litium-nikkeli-koboltti-alumiinioksidi sekä litium-nikkeli-mangaani-kobolttioksidi. Aivan omana metallioksidina tunnetaan litium-mangaanidioksidi. Suhteelliseen uusi katodimateriaali on polyanioihin kuuluva litium-rautafosfaatti. Katodien keskinäisiä eroja on vertailtu kuvassa 3 sekä näiden teho- ja energiatiheys ominaisuudet on esitelty kuvassa 4.

Katodimateriaalien anodi on grafiittia.

Cathode	LCO Lithium Cobalt Oxide	LMO Lithium Manganese Oxide	NCA Lithium nickel cobalt aluminium oxide	NMC Lithium nickel manganese cobalt oxide	LFP Lithium iron phosphate
Type	Metal oxides				Polyanion
Energy	Green				Yellow
Power	Yellow				Green
Safety	Red	Yellow	Red	Yellow	Green
Expected cost	High (Co)	Low	High (Ni, Co)	Medium to High (Ni, Co)	Low
Low temperature	Yellow		Green	Yellow	
High temperature	Yellow	Red	Green	Yellow	Green
Cycle life	Red	Yellow	Green	Yellow	Green
Calendar life	Yellow		Green		

Kuva 3: Kaupallisten Li-Ion katodimateriaalien vertailu. [16]



Kuva 4: Kaupallisten Li-Ion akkujen energia- ja tehotehiys vertailu. [16]

Litium-kobolttioksidi (LCO)

Litium-kobolttioksidi välikerrosrakenne katodilla tuottaa 3,7 V ominaisjännitteen akulle. Litium-kobolttioksidin tehotiheydet ovat 500 W/kg tasolla, mikä on keski-vertainen arvo muiden kemioiden kanssa. Käytännön kapasiteetti rajoittuu 140–150 mAh/g. [3] Kapasiteettiraja tulee vastaan siinä että suhteessa vain 50–55-prosenttia litium-ioneista voi poistua latauksen aikana katodirakenteesta sen romahtamatta [19]. Ylilataaminen aiheuttaa kobolttioksidin hilarakenteen romahtamisen. Vapautuu hapetta, joka aiheuttaa grafiitissa olevan litiumin palamisen. Juuri turvallisuusseikkojen takia litium-kobolttioksidia ei suositella ajoneuvosovelluksiin. LCO on laajasti käytössä pienemmissä kaupallisissa tuotteissa kuten käsityökaluissa sekä tietokoneissa. Toinen yleistymistä jarruttava seikka on laajamittaisen tuotannon aloittamisen arveluttavuus harvinaisen koboltin takia. Raaka-aine koboltin hinta on korkea ja 60-prosenttia katodista koostuu koboltista. Yleisesti LCO kestää 500–1000 sykliä elinikensä aikana, mikä nykyisin on vähemmän kuin muiden kemioiden syklieistot. [16][20][21]

Litium-mangaanidioksidi (LMO)

Litium-mangaanidioksidi katodimateriaali perustuu myrkyttömään ja halpaan mangaaniin. Mangaani tarjoaa ominaisuuksiltaan hyvän substituutin kalliille ja myrkylliselle litium-kobolttioksidille. Ominaisjännite on luokkaa 3,7 V ja käytännön kapasiteetti 115 mAh/g tasolla. [3] Materiaali kykenee säilyttämään rakenteensa vielä 80-prosentin litium-ioni vajavuustilasta huolimatta [19]. Litium-mangaanidioksidin ongelmana on aktiivisen materiaalin liukeneminen elektrolyyttiin korkeissa lämpötiloissa. Ominaisuus lyhentää kennon elinikää. Jotta kenno säilyttäisi suorituskykynsä, se vaatii tuekseen tehokkaan lämmönhallinnan. [22] Litium-mangaanidioksidia pidetään kobolttioksidi- ja nikkelioksidi-pohjaisia katodeita stabiilimpana spinellirakenteensa vuoksi. Litium-mangaanidioksidiin perustuvat akut ovat pitkään rajoittuneet vain niche-markkinoille liukenemisongelmansa vuoksi. Nissan Leaf:ssä sekä Chevrolet Volt:ssä käytettävät litium-mangaanidioksidi-akut viittaavat kuitenkin markkinoiden laajempaan avautumiseen tälle katodimateriaalille [23].

Litium-nikkeli-koboltti-alumiinioksidi (NCA)

Litium-kobolttioksidia lisääineistamalla nikkelillä ja alumiinilla saadaan litium-nikkeli-koboltti-alumiinioksidia. Maksimijännite 4,1 V jää kobolttioksidia hiukan matalammaksi. Ominaisjännite on kuitenkin 3,7 V. Käytännön kapasiteetti on luokkaa 150–190 mAh/g. Akun oikeanlaisella käytöllä päästään 1200 purku- ja lataussykliin. [3] NCA:n korkea energiatiheys, stabiili lämpötilakäyttäytyminen sekä pitkä elinikä ovat ajoneuvoteollisuutta kiinnostavia asioita [24]. NCA on käytössä joissain sarjavalmisteisissa ajoneuvoissa kuten Toyota Prius-pistokehybridissä. Kemian varjopuolina ovat turvallisuus sekä hinta. Katodin sisältämä nikkeli ja koboltti pitävät akun hintaa korkeana. Elektrolyytin myrkyllisyys ei ole parhaimpia piirteitä turvallisuus- ja kierrätysseikkoja ajatellen. NCA on samankaltainen ominaisuuksiltaan kuin NMC,

paitsi mangaanin sijasta käytetään halvempaa alumiinia. Alumiinin käyttö katodimateriaalina on havaittavasti kasvattanut suorituskykyä. NCA on kaksi kertaa kalliimpaa LFP:hen verrattuna korkea hintaisten nikkelin ja koboltin takia. Toisaalta saman energiasisällön ja jännitteen tuottamiseksi NCA selviää 30-prosenttia pienemmällä aktiivisen materiaalin määrällä LFP:en verrattuna. [16][25][26]

Litium-nikkeli-mangaani-kobolttioksidi (NMC)

Litium-nikkeli-mangaani-kobolttioksidi kykenee 140 mAh/g kapasiteettiin. Ominaisjännite on 3,7 V ja maksimijännite on 4,2 V [3]. Katodi sisältää kolmanneksen kutakin nikkeliä, mangaania sekä kobolttia. Nikkelin ominaisuutena on korkea energiatiheys mutta huono stabiilius. Mangaanin avulla saavutetaan pieni sisäinen resistanssi mutta myös energiatiheys jää pieneksi. Korvaavien metallien sopivalla seostuksella voidaan katodi optimoida joko korkeaan energia- tai tehotiheyteen, mutta ei molempiin. Koboltti ja nikkeli pitävät katodin hintaa melko korkealla. Kobolttioksidin tavoin NMC on herkkä lämpökarkaukselle, mutta NMC luokitellaan stabiilimmaksi. NMC akkuja käytetään käsityökaluissa sekä sähköajoneuvoissa. LMO katodin tavoin myös NMC katodin mangaanilla on taipumusta liueta elektrolyytin sekaan heikentäen katodin elinikää. Käyttämättömänä akku kuitenkin säilyy hyvin. [16][24][27]

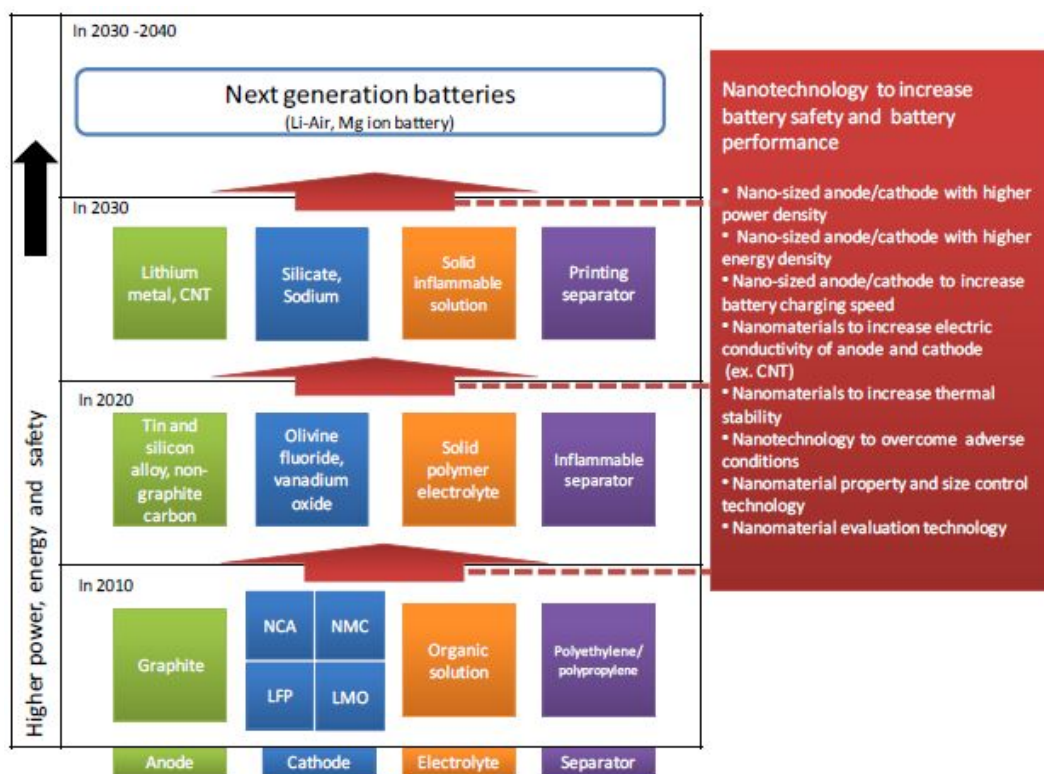
Litium-rautafosfaatti (LFP)

Litium-rautafosfaatin turvallinen jännitealue rajoittuu 2,7 V:sta 3,7 V:iin. Käytännön kapasiteetti on 160 mAh/g luokkaa. [3] Litium-rautafosfaattiakun suuri virranantokyky tekee siitä hyvän tehoakun. Polyanioni-tyypin katodeita, kuten litium-rautafosfaattia, pidetään selvästi turvallisempina kuin metallioksidi-katodeita. Polyanionien molekyyliarakenteessa atomien välillä on vahvemmat sidokset kuin metallioksidoilla. Näin katodirakenne kestää hajoamatta paremmin ylilatausta. Litium-rautafosfaatti on stabiili vielä korkeissakin lämpötiloissa, mutta kylmässä virranantominaisuudet heikkenevät. Litium-rautafosfaatti-akut ovat syklikestoltaan pitkäikäisiä. Edullisten raaka-aineiden puolesta Litium-rautafosfaatti-akut ovat edullisia. Litium-rautafosfaatti-akut soveltuvat ominaisuuksiensa puolesta hyvin kaupalliseen käyttöön. [16][27]

2.6 Litium-akkujen kehitysnäkymät

Energiavarastojen kehitystä ajavat tarve paremmasta suorituskyvystä. CGGC:n tiekartta litium-ioni akkujen kehityksestä ajoneuvokäytössä painottaa energian, tehon sekä turvallisuuden kasvua. Akkujen kehitys on jaettu akkukomponenttien kehitykseen. Uusien materiaalien käytöllä uskotaan saavutettavan parempaa suorituskykyä. Nanotekniikan avulla pyritään kehittämään katodin, anodin sekä separaattorin ominaisuuksia. Tiekartta on hahmoteltu viidelle vuosikymmenelle alkaen 2010-luvulta ja päättyen 2040-luvulle. [28]

Kehitystyön alla on litium-ioni akkujen lisäksi myös muita akkutekniikoita. Näi-



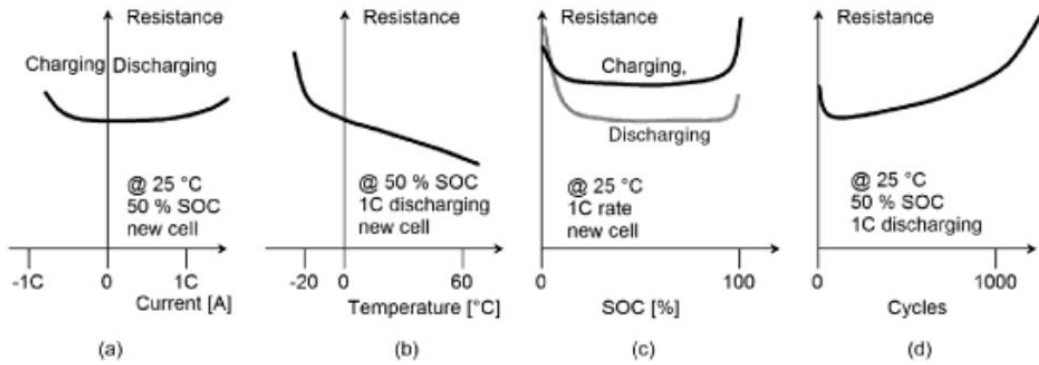
Kuva 5: Akkuteknologian kehitysnäkymät. [28]

tä ovat Sinkki-Ilma, Li-S sekä Li-Ilma. Käytännön energiatihedyydet vaihtelevat aina 350–1700 Wh/kg. Akkutekniikat ovat vielä kehitysasteella. Li-Ilma-akun energiatiheys on samalla tasolla kuin moottoribensiinin. Li-S pääkehityskohteet ovat itsepurkautuminen ja lyhyeksi jäävä sykli-ikä käyttölämpötilassa. Li-Ilma-akun kanssa riittää kehitettävää kaikissa sen komponenteissa sekä lyhyessä sykli-iässä. [29]

2.7 Ominaisuudet

2.7.1 Sisäinen impedanssi

Akkukennon sisäinen impedanssi on ominaisuus, mikä rajoittaa akusta saatavaa tehoa, käytännössä virtaa. Sisäisestä impedanssista puhuttaessa, ilmiö jaetaan resistiivisiin sekä induktiivisiin osiin. USABC määrittelee akun sisäisen resistanssin vastustavan tasavirtaa. Resistanssin arvo vaihtelee virran, varaustilan, iän ja lämpötilan mukaan (Kuva 6). Sisäinen resistanssi syntyy elektronien ja ionien liikettä vastustavien komponenttien summana. Yleisesti käytetään nimiä ohminen resistanssi sekä ioninen resistanssi. Sisäinen induktanssi vastustaa vaihtovirtaa tietyillä taajuuksilla, varaustiloilla sekä lämpötiloilla. [30] Akkukennon resistiiviset ominaisuudet se-



Kuva 6: Resistanssi muuttuu virran, lämpötilan, varaustilan sekä iän mukaan. [35]

littyvät käytettävien materiaalien sähkökemiallisista ja sähköisistä ominaisuuksista sekä akkukennon rakenteesta. Resistanssin on havaittu muodostuvan summana elektrodien aktiivisen materiaalin, elektrolyytin, virtakollektorin sekä napojen resistansseista. [31] Suurimmaksi osaksi impedanssin kasvun on havaittu muodostuvan katodielektrodin aktiivisen materiaalin ja elektrolyytin rajapinnassa [32].

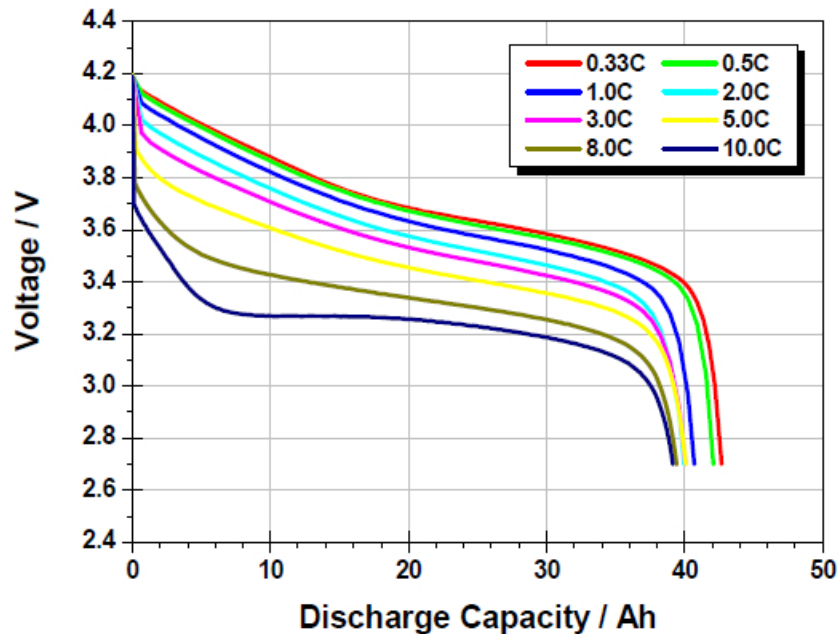
Kuormitetun kennon jännite poikkeaa avoimen piirin jännitteestä (kaava 6). Kennoa purettaessa jännite on alhaisempi ja ladattaessa jännite on korkeampi avoimen piirin jännitteeseen verrattuna (Kuva 7). Ilmiö johtuu kennon sisäisestä resistanssista. Akun kuormitetusta napajännitteestä voidaan erotella ohminen resistanssi sekä ioniset resistanssit. Ohminen resistanssi on ymmärrettävissä perinteisenä ohmin lain mukaisena resistanssina. Ohmisen resistanssin vaikutukset ovat havaittavissa välittömästi. Ioniset resistanssi ilmiöt ovat vaikutuksiltaan millisekunneista aina kymmeniin minuutteihin.

$$U_{cell} = U_{OCV} - IR_i - \eta_1 - \eta_2 - \dots \quad (6)$$

η kuvaa aina yhden aikavakion mittaista ionista resistanssia [33]. Ioniset resistanssit ovat seurausta akun sähkökemiallisista ominaisuuksista ja ne ovat ominaisia kullekin akkutyyppillensä. Ionisten resistanssien vaikutukset ovat havaittavissa eksponentiaalisena muutoksena akun napajännitteessä. Vaikutukset havaitaan myös silloin kun akku irrotetaan piiristä. Tällöin avoimen piirin jännite alkaa liukua takaisin normaalille tasollensa. Ioniset resistanssit jaetaan sähköisiin kaksoiskerros- sekä massan kuljetusvaikutuksiin. Kaksoiskerrosvaikutukset ovat kestoiltaan millisekunneista sekunteihin. Massan kuljetusvaikutukset ovat kestoiltaan sekunneista tunteihin. [31][34][35]

2.7.2 Mallintaminen

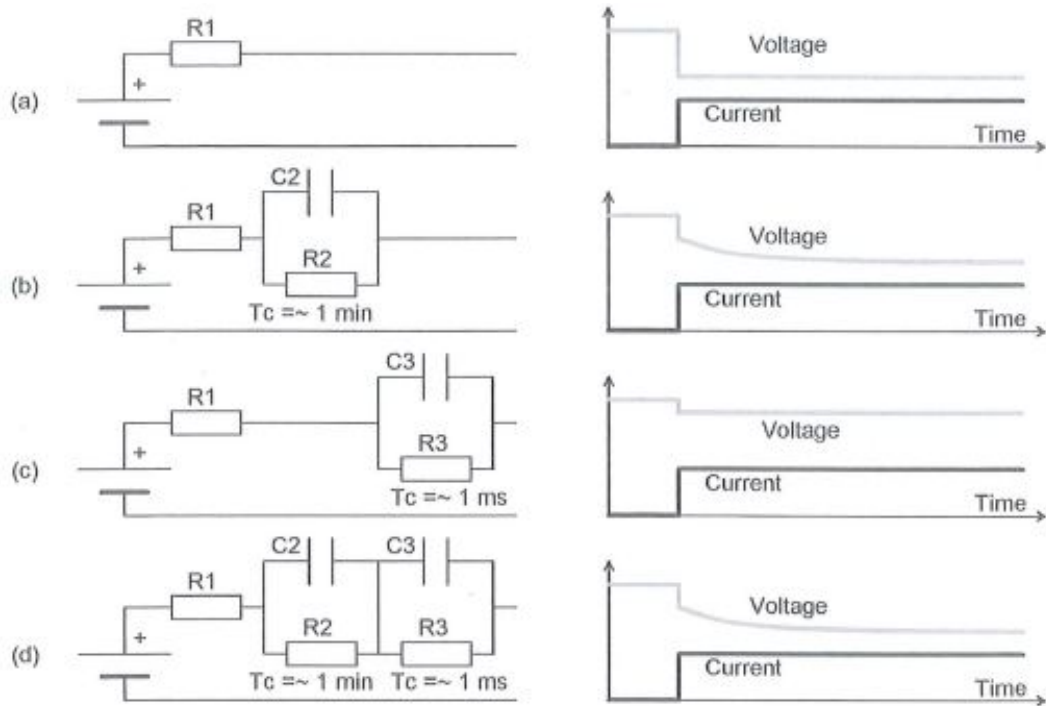
Sisäisen resistanssin määrittäminen on oleellisin asia litium-ioni akun mallintamisessa. Akusta saatava teho, virranantokyky, määräytyvät sisäisestä resistanssista. Lämmönhukka ja energiatehokkuus määräytyvät myöskin sisäisestä resistanssista. Sisäisen resistanssin sekä muiden parametrien määrittämiseksi käytetään matemaattisia malleja. Mallinnusmenetelmiä on useita. Akun tilaa voidaan estimoida akun kemiallisten prosessien mallintamisella tai sähköisen sijaiskytkentämallin kautta. Akun lämpötilan kehittymistä voidaan mallintaa lämmönsiirtymisoppien kautta. Tilasuu- reiden mallintamiseen sähköinen sijaiskytkentämalli soveltuu hyvin. Käytännön sovelluksista löytyvät akkumallit pohjautuvatkin useimmiten sijaiskytkentämalliin. [34][35]



Kuva 7: Kokam Li-Ion purku tasavirtakuormilla huoneenlämmössä. [53]

Useat litium-ioni akun sähköiset sijaiskytkentämallit pohjautuvat Theveninin menetelmään. Menetelmä tarjoaa melko tarkan estimaatin akun varaustilasta sekä dynaamisesta käytöksestä. [36] Kuvassa 8 on esitelty litium-ioni akun sähköisen sijaiskytkentämallin toimintaperiaatetta. Sijaiskytkennän ajatuksena on mallintaa akku sähköisin komponentein. Akku mallinnetaan jännitelähteenä. Sisäinen resistanssi mallinnetaan vastuksena. Ioninen resistanssi mallinnetaan vastus-kondensaattori-parilla. Yhdellä vastus-kondensaattori-parilla voidaan mallintaa yhden aikavakion mittainen resistanssi. Usein on tarpeen mallintaa useamman aikavakion resistansseja. [35]

Mallin parametrit asetetaan akusta mitatun datan perusteella. Akkukennon si-



Kuva 8: Sähköiset sijaiskytkentämallit sekä niiden virta ja jännite kuvaajat. (a) Sisäinen resistanssi, (b) lisättynä relaksoitumisella, (c) lisättynä AC impedanssilla ja (d) kaikki yhdistettynä. [35]

säinen resistanssi lasketaan jännite ja virta muutosten suhteena:

$$R = \frac{\Delta U}{\Delta I} \quad (7)$$

Mittaus voidaan tehdä purkamisen, latauksen tai virran katkaisun aikana [31].

Sisäisen resistanssin kuvatessa jännitteen ja virran suhteellisia muutoksia, impe-

danssi ottaa huomioon myös suhteellisen vaiheen. AC-metodi on määritelty vaihekulmalla:

$$Z = \frac{U(t)}{I(t)} = \frac{U_{max}e^{i(\omega t + \gamma U)}}{I_{max}e^{i(\omega t + \gamma I)}} \quad (8)$$

Kennon impedanssi mitataan syöttämällä kennolle pientä vaihevirtaa kennon tuottaen pienen vaihejännitteen. Usein impedanssin määrittäminen jätetään tekemättä, kun käytännön sovelluksessa akku ei altistu vaihevirralle. [31]

2.7.3 Ikääntyminen

Vanhetessaan litium-ioni akku ei kykene uuden veroisen akun suorituskykyyn: pienentynyt kapasiteetti, heikentynyt virranantokyky ja kasvanut lämmöntuotto. Vanhenemisnopeuteen vaikuttaa akun käyttö. Myös käyttämättömänä akku vanhenee. Kemiasta riippuen litium-ioni akut vanhenevat ominaisella tavallaan. Akkujen elinikään liittyvät käsitteet kalenteri-ikä ja sykli-ikä.

Kalenteri-ikä tarkoittaa ajan myötä tapahtuvaa vanhenemista. Kalenteri-ikäksi määritellään sellainen aika milloin akku altistuu määritettyyn operaation kunnes se ei enää kykene täyttämään ”end of life” - kriteereitä [30]. Kennon sisäisten kemiallisten prosessien on havaittu vanhentavan akkua. Prosesseja kutsutaan itsepurkautumiseksi. Itsepurkautumisen aikana kennon varaustaso vajenee. Suurimmaksi osaksi itsepurkautuminen johtuu ulkoisista olosuhteista kuten kosteudesta tai akkukennon tiiveydestä. Osa itsepurkautumista on elektrolyytin reagoimista elektrodin kanssa synnyttäen anodille korroosiota tai anodikatoa. Itsepurkautumista on myös aktiivisen materiaalin liukenemista elektrolyytin sekaan. Itsepurkautumista ilmenee myös elektrodin passivoitumisena sekä eristykseen kasvuna elektrodin ja virtakollektorin välissä. Osa itsepurkautumisilmiöistä ovat palautuvia (latauksen yhteydessä) ja osa palautumattomia. Palautumattomat prosessit vanhentavat akkua. [60] Vanhenemisestä esiintyy erityisesti säilytettäessä akkua kuumassa ja yli neljän voltin jännitteessä. LFP:lla vanhenemisprosessi on erityisen hidas johtuen alhaisesta kennojännitteestä. [35] Mangaania sisältävillä Li-Ion akuilla kuumassa säilyttäminen aiheuttaa epävakautta sekä positiivisen elektrodin liukenemista. Kalenteri-ikää voi pidentää säilyttämällä akkua alhaisessa lämpötilassa sekä vajaaksi varattuna. [37]

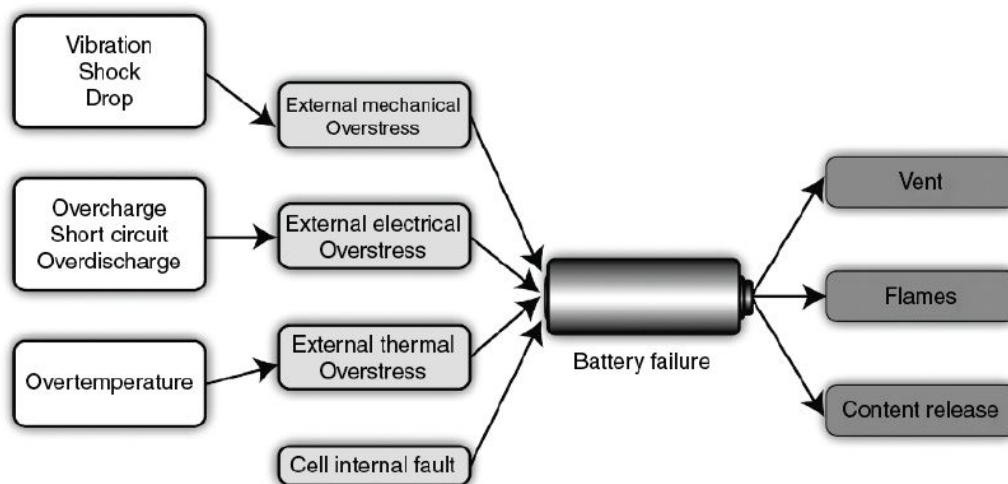
Sykli-ikä kertoo akun eliniän purku-lataus-syklien määränä. Määritelmän mukaan sykli-ikä on syklien määrä määrättyllä purku ja lataus lopetus - kriteerillä, kuten purkusyvyydellä, toistettuna kunnes akku ei kykene täyttämään ”end of life” - kriteereitä [30]. Lataaminen ja purkaminen vanhentavat akkua. Vanhenemisen on havaittu olevan voimakkainta suurilla purkuvirroilla, korkeassa lämpötilassa sekä syvillä purkusyvyyksillä. Vanheneminen ilmenee sisäisen impedanssin kasvuna sekä kapasiteettikatona. Vanhenemistä tapahtuu lataamisen ja purkamisen aikana. Elektrodit laajenevat ja supistuvat. Muodostuu halkeamia. Negatiivisella elektrodilla halkeamiin muodostuu eristystä kasvattava SEI-kerros. Positiivisella elektrodilla

halkeamat lisäävät aktiivisen materiaalin epäjärjestystä. Sykliä myötä tapahtuva aktiivisen materiaalin hupeneminen pienentää kapasiteettia. Eristyvyyden lisääntyminen kasvattaa impedanssia. [37] Lataus-purku-sykliä lisää elektrolyytin reagoimista elektrodien kanssa. Kasvaneen impedanssin myötä akun käyttöiikkuna kapenee. Osa kapasiteettikadosta on siis käyttäjästä johtuvaa alilataamista. Vanheneminen näkyy siis kapasiteettikatona sekä impedanssin kasvuna. Vanhenemista voi hidastaa pienillä virroilla sekä pienellä purkusyvyydellä. Myös korkeita jännitteitä välttämällä elektrodit eivät rasitu liikaa. [38]

2.7.4 Turvallisuus

Litium-ioni akkujen kanssa on syytä ottaa turvallisuusnäkökulmat huomioon. Vikatilanteissa litium-ioni akut ovat muita akkukemioita haitallisempia. Näkemystä selittää kaksi seikkaa. Ensinnäkin litium-ioni akut ovat kykeneviä varastoimaan suuremman määrän energiaa, mikä taas ilmenee vikatilanteessa suurempana määränä lämpöä. Toiseksi litium-ioni akuissa käytetään syttyviä orgaanista liuottimia vesipohjaisten elektrolyyttien sijaan. Elektrolyytin vapautuessa ilmaan se tuottaa entistä enemmän lämpöä ja myös samalla myrkyllisiä kaasuja. [10]

Akkuvalmistajat ovat määritelleet litium-ioni kennoille virta, jännite ja lämpötilakäyttöalueet. Rajojen sisällä kennojen käyttäminen on turvallista. Kennon epävakautta ilmenee usein väärinkäytös-tilanteissa, kun esimerkiksi kennon lämpötila on ajautunut rajojen ulkopuolelle. Kuitenkin yleisin ja ikävin syy kennon epävakauteen on kennon sisäinen vika. Epävakaus voi johtaa kennon lämpökarkaukseen. Lämpökarkausta kuvaillaan tapahtumaksi missä kennon elektrodin ja elektrolyytin reaktiosta tulee itseään ylläpitävä ja reaktio etenee autokatalyyttisessä moodissa [39]. Seurauksena kennon lämpötila kasvaa kunnes kenno tuhoutuu.



Kuva 9: Akkukennon lämpökarkaukseen johtavia syitä [10]

Lämmönkasvun takia n.130°C:ssa separaattori alkaa sulamaan hidastaen kennoreaktioita. Jos lämpötila jatkaa kasvuaan n.180°C:ssa separaattori tuhoutuu, päästäten kennoreaktiot tapahtumaan vapaasti. Tässä tilassa kennon koko energia muuttuu lämmöksi.

Kennon sisäinen vika johtuu usein valmistusvirheistä. Tavallisimpia vikoja ovat riittämätön eristys kennoparien välissä tai riittämätön kennojen kerintä. Myös valmistuksen yhteydessä syntyneiden metallihiukkasten päätyminen kennon rakenteisiin on ollut usein syynä. Metallihiukkanen tunkeutuessaan separaattorin väliin aiheuttaa oikosulun kennoparien välissä. On myös havaittu hapen, mikä on positiiviselta elektrodilta kennoreaktioiden aikana liennut elektrolyytin sekaan, lisäävän lämpökarkaus riskiä [9]. Lämpökarkauksen aikana kennoon saattaa syntyä repeämä mistä purkautuu kaasuja. Kenno voi myös leimahtaa liekkeihin tai syöstä sisältönsä ulos.

Kennovalmistajat määrittelevät akkukennon jännitteelle toiminta-alueen. Litiumioni akuilla se on tavallisesti 3,0–4,2 V. Toiminta-alue määräytyy pitkälti käytettävästä kemiasta. Turvallisuusriskit kasvavat huomattavasti käytettäessä kennoa jänniterajojen ulkopuolella. Kennoa ladattaessa litium-ionit poistuvat positiiviselta elektrodilta. Litium-ionien puute kasvattaa kennon sisäistä resistanssia. Ladattaessa sisäinen resistanssi taas tuottaa lämpöä. Kennon lämpötilan kasvu kiihdyttää elektrolyytin hajoamista ja lämmöntuottoa. Yli sadan asteen lämpötiloissa separaattorin huokokset alkavat sulkeutua ja estävät ionien kulkeutumisen lävitseen. Vaikka kennoreaktiot vähenevät, epästabiilissa tilassaan kennon eksotermiset sivureaktiot saattavat nostaa kennon lämpötilaa edelleen. Lopulta lämmönnousu vie kennon hallitsemattomaan lämpökarkaukseen.

Kennoa purettaessa kennoreaktiot tapahtuvat päinvastaiseen suuntaan. Lähetessä varaustilan loppumista, negatiivisella elektrodilla on puutetta litium-ioneista. Purkamisen jatkuessa kuparijohdin alkaa hapettua. Tämä aiheuttaa kuparin liukenemista elektrolyytin sekaan. Kuparisakka haittaa kennoreaktioiden tapahtumista. Latauksen aikana liuenneesta kuparista muodostuu sakkakerrostumia, jotka tunkeutuessaan separaattorin huokosiin tai kerrostuen elektrodin pinnalle estävät kennoreaktioiden tapahtumista. Useat alilataukset edistävät kuparihaarakkeiden kasvua kennoparien välillä. Pahimmillaan haarakkeet voivat aiheuttaa oikosulun elektrodien välissä, mikä johtaa väistämättä lämpökarkaukseen.

Ulkoinen oikosulku tuottaa suuren purkuvirran, mitä rajoittaa vain kennon sisäinen resistanssi. Isolla akkupaketilla oikosulkuvirta voi olla jopa useita tuhansia ampeereita. Ylisuurivirta johtaa nopeasti kennon repeämiseen. Kennorakenteen hajotessa, elektrolyytti vapautuu ja muodostaa myrkyllisiä kaasuja. Paineen nousu saattaa johtaa jopa kennon ulkokuoren halkeamiseen.

Alhaisessa lämpötilassa litium-ioni akun sisäinen resistanssi on korkea. Litium-ionien kulku SEI-kerroksen läpi on estynyt. Lataaminen kylmässä voi aiheuttaa litiumin kerrostumista SEI-kerroksen ja elektrolyytin rajapintaan. Kerrostumista tapahtuu,

jos latausvirta ylittää kennon varautumiskyvyn. Varautumiskyvyn ylittyessä negatiivisen elektrodin pinnalle saapuvien litium-ionien määrä ylittää määrän mitä on mahdollista erottaa partikkeleita kuljettavista ioneista litium-ioneiksi. Kylmän akun pitkäkestoinen lataus korkealla virralla aiheuttaa ennen pitkään sisäisen oikosulun. Kerrostunut litium kasvaa niin, että se oikosulkee negatiivisen ja positiivisen elektrodin. [10]

Korkeissa lämpötiloissa kennon SEI-kerros hajoaa ja mahdollistaa eksotermiset reaktiot elektrolyytin ja negatiivisen elektrodin välillä. Reaktiot nostavat kennon sisäistä lämpötilaa. Lämpötilan kasvu heikentää separaattoria ja lisää lämpökarkauksen riskiä. SEI-kerroksen hajoamiseen riittää että akkua vain varastoidaan korkeassa lämpötilassa. Tämäkin johtaa ennen pitkää lämpökarkaukseen. [10]

Litium-ioni akkujen turvallisuuden lisäämiseksi on tehty joukko turvallisuustestejä, mitkä on määritetty UL 1642-standardissa [40]. Akkuvalmistajat ovat omalta osaltaan kehittäneet kennojen turvallisuutta. Tavallisimpia turvalaitteita ovat sulkeutuva separaattori, erotusläppä (tear away tab), paineenvapautusventtiili sekä lämpösälpalaitteet. Sulkeutuva separaattori sulaa yli 130°C:ssa sulkien huokosensa ja rajoittaa ionien virtausta lävitseen. Erotusläppä estää ylilatausta vapauttamalla kennon sisäisen paineen. Paineenvapautusventtiili on suunnitellussa kohdassa kennoa ja päästää ylipaineen vapautumaan hallitusti. [41] Lämpösälpalaite toimii piirin katkaisemis-periaatteella, jolloin kennon sisäinen resistanssi kasvaa äärettömäksi. Lämpösälpa on ulkoinen tai sisäinen virran rajoituslaite tai lämpösulake. [42] Esitellyt turvamenetelmät tekevät yleensä peruuttamattomia muutoksia aktivoituessaan akun jatkokäytön kannalta.

2.8 Kennot ja kytkennät

2.8.1 Kennorakenteet

Nappikennossa on metallinen kuori mikä koostuu katodi- ja anodikannesta. Kannot on erotettu toisistaan tiivisteellä. Nappikennot ovat kooltansa kolikon kokoisia. Ne soveltuvat pienielektronisiin laitteisiin ja erityisesti laitteisiin missä pienestä koosta on hyötyä. Nappikennot ovat yleisesti pienitehoisia, mutta korkeaenergisii kennoja. [24][43]

Prismaattinen kenno on nelikulmion muotoinen. Kuoren materiaali on yleensä muovia tai lasia. Prismaattinen kenno rakentuu päällekkäin nidotuista tai toistensa ympärille kerityistä komponenteista. Useimmiten se sisältää nestemäisen elektrolyytin. Prismaattisten kennojen koot vaihtelevat pienistä isoihin. Pienimpiä prismaattisia kennoja, yleensä 800 - 4000mAh, käytetään matkapuhelimissa, tableteissa ja matalan profilin kannettavissa tietokoneissa. Suurimmat kannot ovat kapasiteetiltaan jopa 1000 Ah kokoisia. Sähkö- ja hybridiajoneuvoissa käytettävät kannot ovat kooltaan 20 - 30Ah. Sylinterimäiseen kennoon verraten prismaattinen kenno voi olla

hiukan kalliimpi valmistaa ja sykli-ikä jää pienemmäksi. Rakenteensa vuoksi paineen nousu aiheuttaa muodonmuutoksia kennossa. Lisäksi lämmönsiirtyminen ei ole niin tehokasta kuin sylinterikennolla.[24][43]

Sylinterikennot ovat sylinterinmuotoisia metallikuorellisia kennoja. Akkukomponentit on ladottu päällekkäin ja kääritty kääretortun lailla metallikuoren sisään. Sylinterikkenno kestää suuren sisäisen paineen rakenteensa vuoksi. Sylinteri sisältää paineen vapautusventtiilin, mikä aukeaa paineen kasvaessa liian suureksi. Akun pake-toinnin kannalta sylinterimäinen muoto on tilaa vievä. Vierekkäisten kennojen väliin jäävä ilmatila soveltuu tosin hyvin ilmajäähdytystä ajatellen. Sylinterikennot ovat tavallisesti kooltansa 1000 - 5000 mAh. Yleisin sylinterikkenno on 18650 (halkaisija 18 mm ja pituus 65 mm) ja sen kapasiteetti on 2,2 - 3,1 Ah. 18650 kennolla saavutetaan optimaalisin Wh kustannus: 3Ah 248 Wh/kg. Sylinterikennoja käytetään sähkötyökaluissa, lääketeollisuuden instrumenteissa, kannettavissa tietokoneissa sekä Tesla Motorsin sähköajoneuvoissa. [24]

Pussikkenno koostuu muovimaisesta suojakuoresta. Pussikennot ovat neliskanttisen mallisia, melko ohuita. Kennon päädyistä tulee ulos metalliset akun navat. Pussikennno sisältää kiinteän elektrolyytin. Kennon komponentit ovat yleensä ladottu päällekkäin kerroksittain ja kääritty rullalle. Pussikennot ovat suhteellisen kevyitä. Sisäisen paineen kasvaessa pussikkenno paisuu. Pussikkenno tarvitseekin tuen paisumisen estämiseksi. Lämpö johtuu kennon pinnalle tarjoten suuren jäähdytettävän pinta-alan. Pussikennolla saavutetaan kaikkein tehokkain tilankäyttö, n. 90–95 prosentin pakkaustehokkuus, muista kennorakenteista. Pussikennoja käytetään kuluttaja-, armeija- sekä ajoneuvosovelluksissa. Pussikennnoista ei löydy standardoituja kokoja, valmistajilla ovat omat kokonsa. Pussikennoja löytyy aivan pienistä aina 240 Ah. [24][43]

Pussimaisella ja prismaattisella rakenteella voidaan saavuttaa suurempi energiatiheys kuin sylinterikennolla, mutta teknologia tähän ei ole vielä kypsä. 18650-sylinterikennojen kilowattitunti-kustannus on yhä alhaisin. Vertailuksi Nissan Leafin pussi- tai prisma-kennot kustantavat 423 euroa/kWh ja parhaimmillaan pussi- tai prisma-kennnoilla päästään 325 euroon/kWh. Matalin hinta on saavutettu Teslan sähköauton 18650-kennnoilla. Tehotiheyden hinta Tesla Gen III-akulla on tällöin 270 euroa/kWh. [24]

2.8.2 Kytkentätavat

Sarjaan kytkentä kasvattaa jännitettä. Kennon positiivinen napa kytketään toisen kennon negatiiviseen napaan. Kennojen tulisi olla tyypiltänsä ja erityisesti kapasiteetiltaan samanlaisia. Epäbalanssi vähentää akkupaketista saatavaa kokonaisvarausta. Akkua purettaessa alhaisimman varauksen kenno määrittää akkupaketin minimijännitteen. Ja ladattaessa korkeimman varauksen kenno määrittää akkupaketin maksimijännitteen. Kennojen keskinäisen resistanssierot aiheuttavat eritasoiset

jännitteet latauksen ja purkamisen aikana. Itsepurkautuminen vie sarjaan kytketyn akkupaketin epäbalanssiin ajan myötä. [24][35][44]

Rinnankytkentä kasvattaa akkupaketin kapasiteettia ja virranantokykyä vähentämällä kokonaisresistanssia. Rinnankytkettävien kennojen on oltava samankaltaisia kennoja. Ennen kytkemistä on huolellisesti varmistettava, että kennojen jännitteet ovat yhtä suuret. Vanheneminen voi aiheuttaa yllättäviäkin ongelmia rinnankytkettyjen kennojen kanssa. Keskinäiset resistanssierot aiheuttavat erisuuruiset latausvirrat rinnankytkettyjen kennojen välille. Korkearesistanssinen kenno rinnankytkennässä ei ole niin haitallinen kuin sarjaan kytkennässä. Yhden kennon pettäessä muut kennot kykenevät paikkaamaan kennon heikon suorituskyvyn. Kennon joutuessa oikosulkuun, se voi ajautua lämpökarkaukseen viallisen kennon syöden muiden kennojen energian. Lämpökarkauksen aikana suuret virrat voivat vahingoittaa muita kennoja. [24][44]

Sarjaan kytkettyjen pakettien rinnankytkentä kasvattaa sekä jännitettä, kapasiteettia että virranantokykyä. Kennot vanhenevat kukin yksilöllisellä vauhdilla. Ajan myötä rinnankytketyssä paketissa on kapasiteetiltaan eroavia kennoja. Kapasiteetti eroista johtuen osa kennoista ylilatautuu latauksen aikana. Toistuva ylilataaminen vahingoittaa kennoja ja pahimmillaan aiheuttaa lämpökarkauksen. Ongelma voidaan välttää lataamalla kukin akkupaketti erikseen täyteen. Akunhallintajärjestelmillä kyetään kennokohtaiseen valvontaan ja suojaukseen niin että koko paketin elinikä pitenee sekä vaaratilanteet vähenevät. [45]

3 BMS - Akunhallintajärjestelmä

Akunhallintajärjestelmä on elektroninen järjestelmä, kytketty kiinteästi akun yhteyteen, mikä valvoo ja ohjaa suojaan akkupaketin kuntoa. Akunhallintajärjestelmällä voi olla seuraavan kaltaisia ominaisuuksia:

- * Mittaus
- * Hallinta
- * Evaluointi
- * Kommunikaatio
- * Lokikirjaus

Akunhallintajärjestelmistä esiintyy eritasoisia versioita. D. Andrea on kirjassaan ”Battery Management Systems” luettellonut akunhallintajärjestelmiä olevan regulaattoreita, mittajia, monitoreita, balansoijia sekä suojaajia. Balansoijassa sekä suojaavassa järjestelmässä on tarjolla kaikki mahdolliset akunhallintajärjestelmän ominaisuudet. Muut järjestelmät ovat karsittuja ominaisuuksiltaan ja näin ollen myös epäpäteviä käytettäväksi isossa akkujärjestelmässä. Suojaavat - järjestelmät ovat integroitu osaksi akkua ja usein tarkoitettu vain pienille akkujärjestelmille. Balansoija on tyypiltään tarkoitettu ison akkujärjestelmän kanssa käytettäväksi.

3.1 Toiminnot

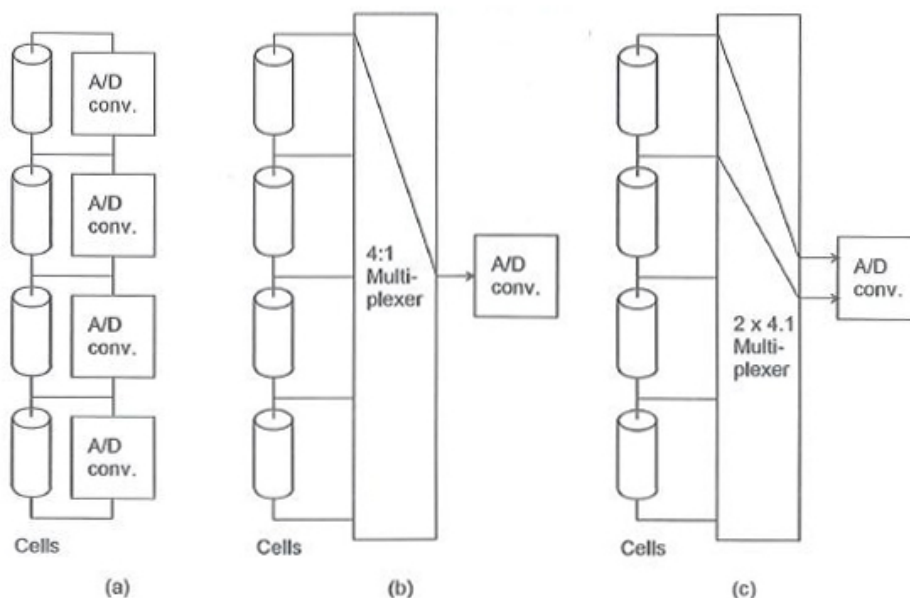
3.1.1 Mittaus

Akun tilaa havainnoidaan mittaamalla sen jännitettä, virtaa ja lämpötilaa. Tilatietoa käytetään akun tilan havainnoinnissa. Akunhallintajärjestelmä valvoo akun tilaa ja keskeyttää tarvittaessa akun käytön havaitessaan akun ajautuneen turvallisten rajojen ulkopuolelle. Akun tilaa kuvaavien estimaattien laskeminen perustuu mittaustiedon käyttämiseen.

Jännitettä mitataan yksittäin kennoilta ja koko paketilta. Tarkka tilatieto saadaan kennojännitemittauksella. Mittausten samanaikaisuus on merkitsevää. Akun kuormitus voi vaihdella nopeasti ja eriaikaiset mittaustapahtumat eivät anna oikeata kuvaa akun tilasta. Mittauksen tarkkuudella on vaikutusta estimaattien tarkkuuteen.

Jännitemittausmenetelmät on esitelty kuvassa 10. Diskreetissä mittausmenetelmässä jokaisella kennolla on oma A/D-muunnin. Mittaukset ovat samanhetkisiä. Menetelmä on rakenteeltaan kallis. Vaihtoehtona on käyttää vain yhtä A/D-muunninta ja tulovalitsinta. Menetelmä on nimeltään yksipäätteinen tulovalitsin (single-end multiplexed). Tulovalitsin mittaa yhden kennon potentiaalin kerrallaan. Tulovalitsin on kytkettynä mittasignaalin digitoivaan A/D-muuntimeen. Mittaustavan ongelmana ovat eriaikaan mitattavat kennojännitteet. Kokonaisjännitteet ollessa aaltoileva, kennojännitteisiin syntyy virhettä. Hiukan kehittyneempi tapa on käyttää differentiaalista tulovalitsinta, missä kaksi potentiaalia mitataan yhtäaikaaisesti. Kaksinapainen

A/D-muunnin digitoi mittaukset. Tapa eroaa edellisestä menetelmästä vain sen osin, että kaksi kennojännitettä saadaan yhtäaikaaisesti mitattua.



Kuva 10: Jännitteen mittaaminen: a) Diskreetti b) Tulovalitsin c) Diff. tulov. [35]

Virtaa mitataan käytännössä kahdella tavalla: sivuvirtavastuksella tai hall-anturilla. Sivuvirtavastus on matala resistanssinen vastus, mikä kytketään osaksi virtakaapelia. Läpikulkeva virta ohmin lain mukaisesti aiheuttaa pienen jännitehäviön vastuksen yli. Vastuksen jännite on suoraan verrannollinen läpi kulkevaan virtaan. Vastuksen jännite skaalataan vahvistimella mittalaitteelle sopivaksi. Virtamittaus on tarkka, eikä virran mittauksessa esiinny virtavaellusta nollavirralla. Sivuvirtavastuksen huonoina puolina ovat lämpötilavaihteluiden aiheuttama resistanssin muutos sekä pieni tehohäviö mittauspisteessä. Sivuvirtavastus on osa mitattavaa virtapiiriä, joten se täytyisi erottaa mittalaitteesta.

Hall-anturi perustuu hall-ilmiöön. Anturi on muunnin, mikä tuottaa jännitteen suhteessa virran aiheuttamaan magneettikenttään. Hall-anturi kytketään mittajohtimen ympärille ja se on erotettu mittapiiristä. Hall-anturi sietää lämpötilan muutoksia hyvin ja tarjoaa kokonaisuudessaan tarkan mittauksen. Mittausvirhettä aiheuttaa nollavirran vaeltelu. Vaelteluun vaikuttaa lämpötilan muutokset. Anturin säännöllinen kalibrointi nollavirralla onkin tarpeellista aina kun mahdollista.

Lämpötilan mittaamiseksi on olemassa lukuisa määrä antureita. Lämpötilan mittaamisessa kyse on lämpötilan muutoksen aiheuttamasta resistanssin tai jännitteen muutoksesta. Lämpötila voidaan mitata joka kennolta erikseen tai harvemmin. Mittaamattomien kennojen lämpötilat estimoidaan. Lämpötila on tärkeä tieto akun käyttölämpötilarajoitteiden takia. Yksittäisen kennon lämpötilamittauksella

voidaan havaita kennon sisäisiä ongelmia. Balansointivastuksen lämpötila on myös hyödyllinen tieto vastuksen toiminnan sekä jäähdytyksen kannalta. [35]

3.1.2 Hallinta

Akunhallintajärjestelmä hallinnoi akkua kolmella tavalla: suojaamalla, balansoimalla sekä lämmönhallinnalla.

Suojaus

Akunhallintajärjestelmä kykenee suojaamaan akkua sen ajautuessa ulos turvalliselta käyttöalueelta. Tilanteet, joissa akku on turvallisen käyttöalueen ulkopuolella ovat yli- tai alijännite, liian suuri lataus- tai purkuvirta ja liian kuuma tai kylmä. Akunhallintajärjestelmä tarkkailee akun jännitettä, virtaa sekä lämpötilaa ja pyrkii vaikuttamaan akun käyttöön niin ettei turvalliselta käyttöalueelta poikettaisi. Käytännössä akunhallintajärjestelmä erottaa akun piiristä tai rajoittaa sen käyttöä. [35]

Balansointi

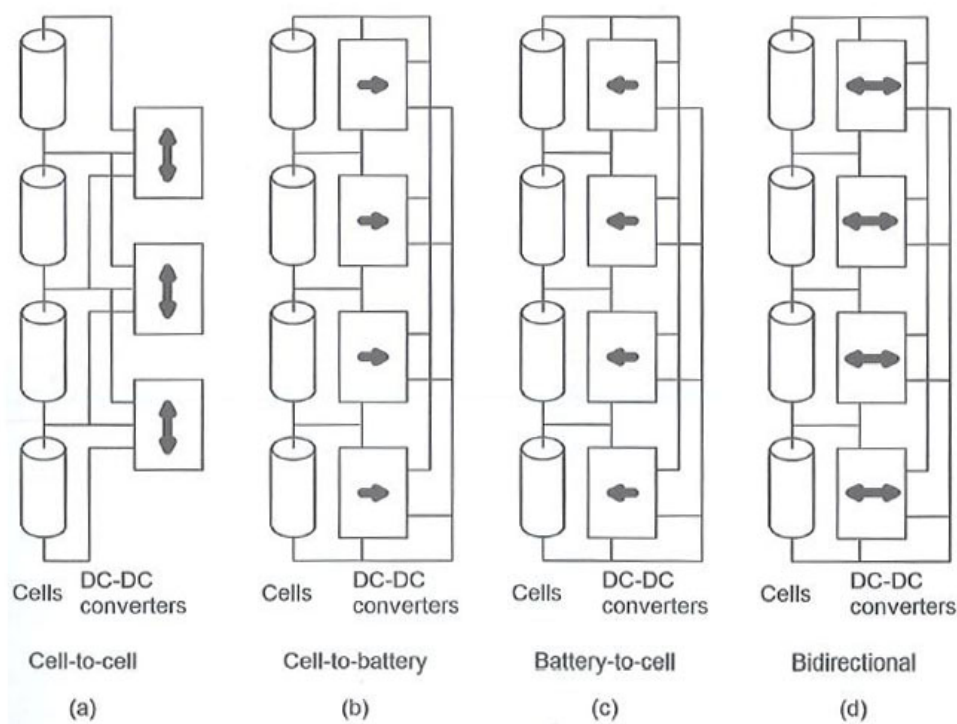
Balansoinnilla saatetaan kaikkien kennojen varaustaso (SOC) samalle tasolle. Menettely mahdollistaa akkupaketin kapasiteetin maksimaalisen käytön. Balansointitekniikoita on kolmenlaisia: passiivinen, aktiivinen sekä uudelleenjako-tekniikka. Balansointia ohjataan balansointi-algoritmeilla. Andrea D. esittelee kirjassaan ”Battery Management Systems” kolme algoritmia: jännite-, loppujännite- sekä SOC historia-algoritmi.

Käyttöönotettavalle akkupaketille tehdään ensimmäinen balansointi nk. esibalansointi. Alkutilanteessa epätasapaino voi olla suuri kennojen keskinäisen kapasiteetin vaihtelevuuden sekä varaustilan vuoksi. Muuten balansointia tehdään jatkuvasti akun käyttämisen yhteydessä. Menettely estää varaustilaeron kasvamisen.

Passiivisella balansoinnilla tarkoitetaan balansointitekniikka, missä kennojen ylimääräinen varaus hukataan lämmöksi resistiiviseen elementtiin. Balansointipiirissä transistori sulkee kennon ja vastuksen samaan piiriin jolloin virta kulkee balansointivastuksen kautta. Vastus lämpenee ja usein vastusta on jäähdytettävä. Jäähdyttelyjakson pituus on riippuvainen piirin suunnittelusta. Passiivinen balansointi hukkaa käytännössä kaiken balansointiin kuluvan energian.

Aktiivisessa balansoinnissa ylimääräinen energia poistetaan kennoilta ja jaetaan energia niille kennoille missä varaustaso on alempana. Aktiivinen balansointi pyrkii minimoimaan balansoinnissa aiheutuvan hukkaenergian. Ylimääräinen energia siirretään sinne minne sitä tarvitaan. Siirtohäviöiden takia kuitenkin noin 30-prosenttia balansointienergiasta hukataan. On myös huomattava, että aktiivinen balansointi kuluttaa energiaa seistessään käyttämättömänä. Aktiivisia balansointitopologioita on neljää tyyppiä: kennolta kennolle, kennolta akkuun, akulta kennolle sekä kaksi-

suuntainen. Eri topologiat on esiteltynä kuvassa 11. Aktiivinen balansointitekniikka on hankintakustannuksiltaan kalliimpaa kuin passiivinen tekniikka, koska aktiivinen tekniikka sisältää määrältään enemmän komponentteja.



Kuva 11: Kuvassa on esitetty neljä aktiivista balansointitopologiaa. [35]

Kennolta kennolle-topologiassa on matalajännite dc-dc-muuntajat vierekkäisten kennojen kanssa kytkettynä. Energiaa siirretään korkeamman jännitteen kennolta matalamman jännitteen kennoon. Topologian etuna voidaan pitää yksinkertaista rakennetta sekä halpoja muuntajia. Balansoinnin tapahtuessa vierekkäisten kennojen välillä, energia ei virtaa suoraan kohteeseensa. Siirtohäviöiden kertyessä myös balansoinnin kokonaishyötysuhde heikkenee.

Kennolta akulle-topologiassa on galvaanisesti erotetut dc-dc-muuntajat jokaisen kennon ja akuston välissä. Jännite muunnetaan kennolta akulle. Korkeimman potentiaalin kenno luovuttaa ylimääräisen varauksensa akulle. Varaus jakautuu näin tasaisesti kaikkien muiden kennojen kesken. Topologian etuna on mahdollisuus matalajännite transistoreiden käyttämiseen balansointivirran ohjaamiseksi. Tällä topologialla on kaikista nopein balansointiaika tilanteessa, kun vain muutama kenno on alajännitteessä; suurin osa muuntajista on tällöin käytössä.

Akulta kennolle-topologiassa on galvaanisesti erotetut dc-dc-muuntajat akun ja kennojen välissä. Muuntosuunta on akulta kennoille päin. Balansoinnissa akku siirtää energiaa alajännitteisille kennoille. Akulta kennolle-topologian balansointiaika

on lyhin tilanteessa, missä useimmat kennot ovat alajännitteisiä. Muuntajien käytösuhde on tällöin korkeimmillaan. Korkeajännitepuolen transistoreiden ohjaamiseksi vaaditaan erotettu ohjaus matalajännitepuolelta. Kustannuksia muihin topologioihin nostavat kalliimmat korkeajännitetransistorit. Järjestelmä on periaatteessa toteutettavissa yhdellä isolla muuntajalla, mistä on lähdöt kaikille kennoille.

Kaksisuuntainen-topologia on yhdistelmä kahdesta edeltäneestä topologiasta. Kaksisuuntaisuus yhdistää näiden molempien parhaat puolet. Balansointiaika saadaan kaikissa tapauksissa lyhyeksi. Järjestelmän kompleksisuuden myötä kustannukset ovat korkeat.

Uudelleenjako-tekniikassa käytetään hyväksi kaikkien kennojen kapasiteetti. Kun passiivisessa ja aktiivisessa balansoinnissa pyritään käyttämään akkupaketin kaikki SOC, uudelleenjaossa kaikkien kennojen yhteinen varaus pyritään hyödyntämään. Tavallisesti akkupaketin maksimikapasiteetin määrää kenno, millä on pienin kapasiteetti. Olettaen että kennot on balansoitu loppujännitteeseen, uudelleenjakoa käytetään kennojen lähestyessään minimijännitettään. Kun purkamisen yhteydessä pienimmän kapasiteetin kenno saavuttaa minimijännitteensä, aletaan kennoa lataamaan täydemmistä kennoista. Lopulta kaikki kennot saavuttavat minimijännitteen. Vastaavasti ladattaessa akkua, maksimijännitteen saavuttaneelta kennolta siirretään ylimääräinen varaus vielä vajaille kennoille. Näin ollen akkupaketin kokonaisvaraus saadaan hyödynnettyä. Uudelleenjako vaati toimiakseen tehokkaat dc-dc muuntajat. Käytännön tehon ollessa kymmenien kilowattien luokkaa, komponenttien on kyettävä siirtämään kennojen välillä 10–100 A virtaa. Tehokkaiden komponenttien takia kustannukset ovat uudelleenjako-tekniikassa korkeat. Uudelleenjako sopii sovelluksiin, missä akkupaketilta haetaan korkeata teho- ja energiatiheyttä kustannuksista välittämättä.

Jännitteeseen perustuva algoritmi on yksinkertaisin balansointi-algoritmeista. Algoritmin toimintaperiaate: ”ladattaessa poistetaan varaus kennoista, joilla korkein jännite”. Ajatuksena on, että kennon varaustila on suoraan suhteessa kennon jännitteeseen. Jännite ominaiskäyrästä lukien jännitelukema kertoo sitä vastaavan varaustilan. Asia teoriassa on näin yksinkertainen, mutta todellisessa tilanteessa on mukana kennojen sisäinen resistanssi. Ominaiskäyrä on määritelty avoimen piirin jännitteen suhteen. Todellisessa mittaustilanteessa piiri on suljettu. Avoimen piirin jännite kasvaa suljetussa piirissä kennon sisäisen resistanssin verran. Toinen ongelma on ominaiskäyrän muoto. Suurimmalta osaltaan käyrä on muodoltaan laakea. Jännite-eroa on vaikea havaita pienellä varauksen muutoksella. Erotuskykyyn vaikuttaa myös mittaustarkkuus. Algoritmi on mahdollinen käytettäväksi, jos tunnetaan tarkkaan jokaisen kennon sisäinen resistanssi. Avoimen piirin jännite on mahdollista laskea kaavan (9) mukaisesti.

$$OCV = U_m - IR_s, \quad (9)$$

missä OCV on avoimen piirin jännite, U_m mitattu kennojännite, I kennon läpi kulkeva virta sekä R_s kennon sisäinen resistanssi.

Loppujännite-algoritmi jättää huomioimatta ominaisjännitekäyrän tasaisen osuuden. Algoritmin toimintaperiaate: ”energia poistetaan kennoilta joiden jännite on kynnysarvon yläpuolella”. Loppujännite-algoritmi balansoi ainoastaan lähellä varaustilan maksimia. Tällöin jännitekäyrän muoto on nopeasti muuttuva ja jännitteen muutos suhteellisen helposti mitattavissa. Algoritmin varjopuolena on lyhyt balansointiin käytettävä aika suhteessa lataukseen menevään aikaan. Pitkää balansointiaikaa voi tosin kompensoida suurella balansointivirralla. Samoin kuin jännitealgoritmissa, kennojen sisäinen resistanssi sekoittaa tilannetta. Latauksen aikana resistanssi voi muuttaa jännitettä enemmän kuin varaustilan muutos tekisi. Tällöin varausta poistetaan suurimman resistanssin kennolta, eikä siltä millä on suurin SOC.

SOC-historia-algoritmi käyttää hyväkseen jokaisen kennon vanhaa SOC:tä. SOC-historia-algoritmi toimii seuraavasti: mitataan kennojen avoimen piirin jännite. Jännitteestä päätellään kunkin kennon SOC ja lasketaan SOC:stä kennojen DOD. DOD:stä voidaan päätellä kennojen varaustilojen erot. Balansointivirta tuntien voidaan laskea balansointiaika kennojen välillä. Balansoidaan kennoa määrätyn ajan. Latauksen päätteeksi balansoinnin tulos voidaan todentaa avoimen piirin jännitteestä. DOD lasketaan kaavalla (10). Balansointiaika taas saadaan tuntemalla varaustilan ero sekä balansointivirta (kaava (11)). Yhden lataussyklin aikana algoritmi oppii tuntemaan jokaisen kennon varaustilan. [35]

$$DOD = Capacity * (1 - SOC/100) \quad (10)$$

$$Balancetime = \text{deltacharge} / \text{balancecurrent} \quad (11)$$

Lämmönhallinta

Akun lämmöntuotanto kasvaa suurilla virroilla sekä matalassa lämpötilassa. Jäähdytys on tarpeellinen ajoneuvosovelluksissa. Lisäksi kylmät olosuhteet vaativat yläpitolämmitystä.

Lämmönhallintajärjestelmä sovelluksesta riippuen jäähdyttää tai sekä myös lämmitää akkua. Seuraavat tekijät määrittelevät lämmönhallintajärjestelmän mitoituksen: lämmöntuottomäärä, energia tehokkuus, herkkyys lämpötilalle, kylmä ja lämmin suorituskky sekä elinikä. [47] Lämmönhallintajärjestelmä voi olla ilmavaihtoinen, nestekiertoinen, lämmönvarastointielementtejä käyttävä kuten olomuodonmuutosmateriaalit tai yhdistelmä mainituista menetelmistä. On olemassa passiivisia ja aktiivisia lämmönhallintajärjestelmiä. Passiivinen järjestelmä hyödyntää ainoastaan ympäristön lämpöä. Aktiivinen järjestelmä tuottaa koneellisesti tarvittavan jäähdytyksen tai lämmityksen. [46]

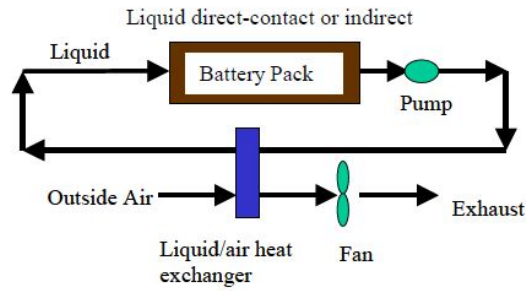
Akkupakettia voidaan jäähdyttää tai lämmittää liikuttamalla ilmaa akkupaketin sisällä. Paketin lämmittämiseksi sisään tulevan ilman on oltava lämpimämpää kuin itse akkupaketin lämpötila on. Ilma voidaan tuoda sovellusjärjestelmän muualta syntyneestä hukkalämmöstä. Ajoneuvoissa voidaan käyttää matkustamon ilmaa. Aktiivisessa ilmanvaihtojärjestelmässä takaisinkierrätettävä ilma johdetaan lämmittimen tai jäähdyttimen kautta takaisin akkupaketille. [47]

Nestekiertoisissa lämmönhallintajärjestelmissä neste siirtää lämpöä tehokkaasti akkupaketin sisältä (Kuva 12). Nestekierto sisältää pumpun ja lämmönvaihtimen. Neste lämpenee tai jäähtyy lämmönvaihtimen kautta kulkiessaan. Akkupaketin jäähtymistä voidaan säätää nesteen virtausnopeuden muuttamisella. Yksinkertaisimmassa jäähdytyskierrrossa lämmönvaihdinta jäähdytetään tuulettimen kanssa. Lämmittäminen onnistuu ohjaamalla lämmin ilma lämmönvaihtimen läpi. Lämmönvaihdin voi olla myös nesteestä nesteeseen-tyyppinen. Järjestelmä sisältää tällöin toisen nestekierron. Integrointi esimerkiksi ajoneuvon jäähdytysjärjestelmään on mahdollista. Käytettävä neste on tyypillisesti veteen sekoitettavaa jäähdytysnestettä tai öljyä. [47]

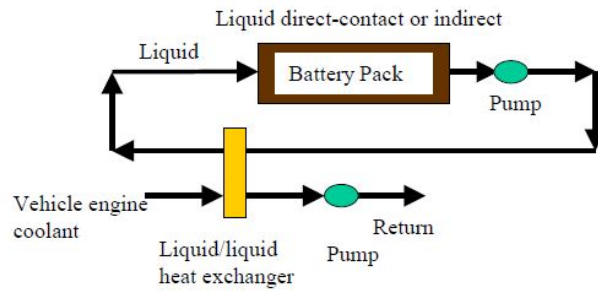
Olomuodonmuutosmateriaalit ovat materiaaleja, mitkä varastoivat suuren määrän energiaa vaihtaessaan olomuotoaan kiinteästä aineesta nesteeksi. Olomuodonmuutosmateriaalit ovat piileviä lämmönvarastointimateriaaleja, tarkoittaen että aineen lämpötila säilyy vakiona olomuodonmuutosprosessin aikana. Yhdisteen kemialliset sidokset sitovat ja vapauttavat lämpöä. [48] Aucklandin Yliopistossa tehtiin tutkimusta olomuodonmuutosmateriaalien käytöstä litium-ioni akkujen lämmönhallintajärjestelmissä. Käytetty materiaali oli muodostettu parafiinivahan ja grafiittilastujen yhdisteestä. Parafiinivahalla on hyvä lämmönvarastointikyky. Grafiitilla on hyvä lämmönjohtavuus. Mainittua komposiittia käytettiin passiivisena jäähdyttäjänä. Saatujen tulosten mukaan yhdiste kykeni hidastamaan 10 % lämmönkasvusta, mikä aiheutui akkua purettaessa maksimikuormituksella. [46] Tulos osoittaa että yksistään jäähdyttävänä elementtinä lämmönvarastointimateriaalia ei voi ajatella ison akkupaketin jäähdyttämiseen. Materiaalilla voisi kuitenkin olla käyttöä lämmön ylläpidossa kylmissä olosuhteissa. Materiaalia voisi mahdollisesti hyödyntää paketoitumateriaalina lämmön eristykseenä sekä varastoivana elementtinä. [48].

Nestekiertoinen järjestelmä tarjoaa parhaimman lämmönsiirron. Nesteiden suurempi viskositeetti ja parempi lämmönjohtavuus tekee niistä ilmaa tehokkaampia lämmönsiirtäjiä. Esimerkiksi öljy siirtää lämpöä 1,5-3 kertaa tehokkaammin kuin ilma. Ilmanvaihtojärjestelmät ovat taas halvempia ja helpompia asentaa kuin nestekiertoiset järjestelmät. Eräissä sovelluksissa on tarvetta ilmastoinnille jos akkupaketti tuottaa vaarallisia kaasuja [46]. On myös muistettava, että nestekiertoinen järjestelmä sisältää verraten paljon nestettä. Nestemäärän lämmittäminen sitoo itsessään suuren lämpömäärän. [47]

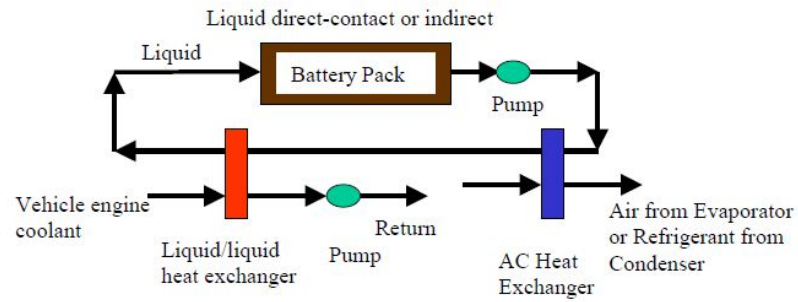
Passiivinen järjestelmä soveltuu käytettäväksi silloin kun ympäristön lämpötilaero



D. Passive Cooling – Liquid Circulation



E. Active Moderate Cooling/Heating – Liquid Circulation



Kuva 12: Kuvassa on kolme nestekiertoista lämmönhallintajärjestelmää. [47]

on riittävä jäähdyttämään järjestelmää. Lämmitysmielessä passiivinen järjestelmä on soveltuva, kun systeemin käytön aikainen hukkalämpö tarjoaa riittävästi energiaa. Lisäksi passiivinen lämmönhallintajärjestelmä kuluttaa vähemmän energiaa ja on halvempi hankkia. Muissa tapauksissa on käytettävä aktiivista järjestelmää tai lämmönvarastointimateriaaleja. Aktiivinen järjestelmä tarvitaan kun ympäristö ei tarjoa riittävä lämpötilaeroa jäähdytys- tai lämmitystehoa ajatellen. Riittävän kuumassa tai kylmässä akun toimintalämpö uhkaa vaarantua passiivisella lämmönhallintajärjestelmällä. [47] Akun lämmitystarpeet ovat melko rajoittuneet. Käyttämisen yhteydessä tapahtuvan lämmöntuotannon takia akkua harvemmin tarvitsee lämmitellä. Lämmitystarpeet tulevat vastaan kylmissä olosuhteissa ja tilanteissa kun akkua ei käytetä. Näissä olosuhteissa tarvitaan aktiivista lämmönhallintajärjestelmää tai lämmönvarastointimateriaaleja pitämään akun lämpötila toimintalämpöisenä. Lämpöenergia voidaan tuottaa ilmastoinnin lauhdutin kennosta, sähkövastuksilla, polttoaine lisälämmittimellä tai akun omilla balansointivastuksilla. [19]

Ilmanvaihtojärjestelmä voidaan suunnitella niin, että ilma liikkuu suoraan pakeitin päästä toiseen tai niin että ilma jaetaan yksittäisten kennojen väliin. Puhutaan sarja- ja rinnakkaisjaosta. Akkukennon epätasaisen lämpenemisen vuoksi on havaittu rinnakkaisen jäähdytyksen tasaavan kennon lämpötilajakaumaa sekä tuottavan tasaisen lämpöjakauman myös koko akulle. Menetelmät on sovellettavissa myös nestekiertoiselle järjestelmälle. [47]

Lämmönhallintajärjestelmän toteutuksessa on mahdollista yhdistellä kolmea aikaisemmin esiteltyä lämmönsiirtomenetelmää toisiinsa. On huomattava myös, että akkupaketin sijoitus vaikuttaa valittavaan jäähdytykseen.

Lämmönhallintajärjestelmän ohjaamiseksi on monenlaisia vaihtoehtoja. Ajoneuvosovelluksessa akkupaketin lämmönhallintajärjestelmä on vain osa koko ajoneuvon lämmönhallintajärjestelmää. Toyota Priuksessa akunhallintajärjestelmä tarjoaa akusta tietoa ylemmän tason ohjaimelle, mistä ohjaaminen tapahtuu. [49] Lämmönhallintajärjestelmää voidaan ohjata suoraan, kuten Elithion Lithiumate - akunhallintajärjestelmässä [35].

3.1.3 Evaluointi

Akunhallintajärjestelmä estimoi mittausdatan perusteella akuntilaa kuvaavia suureita. Näitä suureita ovat varaustila, purkusyvyys, terveystila, resistanssi ja kapasiteetti. Suureiden perusteella voi tehdä päätelmiä akun ikääntymisestä ja suorituskyvystä. Suureiden avulla voi myös ennakoida akun tulevaa käyttöä. [35]

Purkusyvyys–Depth of Discharge (DOD) (%): Purkusyvyys ilmaisee akun kapasiteetista puretun prosenttiosuuden maksimikapasiteetista. Syväpurkamisella tarkoitetaan vähintään 80-prosentin purkusyvyyttä. [50]

Varaustila–State of Charge (SOC) (%): Varaustila ilmaisee akun kapasitee-

tin suhteessa akun maksimikapasiteettiin. Usein SOC:n laskennassa hyödynnetään virta-integrointia akun kapasiteetin vaihtumisen määrittämiseksi. [50]

Terveystila–State of Health (SOH) (%): Terveystila on hyvyysluku akun kunnosta verrattuna sen ideaaliseen kuntoon. SOH:n laskennassa otetaan useimmiten huomioon latauksen ottokyky, sisäinen resistanssi, jännite ja itsepurkautuminen. [43][51]

Sisäinen resistanssi–Internal resistance (IR) ($m\Omega$) : Akun resistanssi on usein eri suuruinen latauksessa ja purkamisessa. Sisäinen resistanssi on myös riippuvainen varaustilasta. Sisäisen resistanssin kasvaessa akun hyötysuhde laskee ja lämpöstabiilisuus vähenee samassa suhteessa kuin akun energia muuttuu lämmöksi. [50]

Kapasiteetti (Ah): Kulometrinen kapasiteetti kertoo käytettävissä olevat ampeeritunnit, kun akkua on purettu määrättyllä purkuvirralla (spesifioitu C-määrä) 100 prosentin varaustilasta katkaisujännitteeseen asti. Kapasiteetti lasketaan kertomalla purkuvirta (A) purkamiseen käytetyllä ajalla (h). [50]

3.1.4 Kommunikaatio

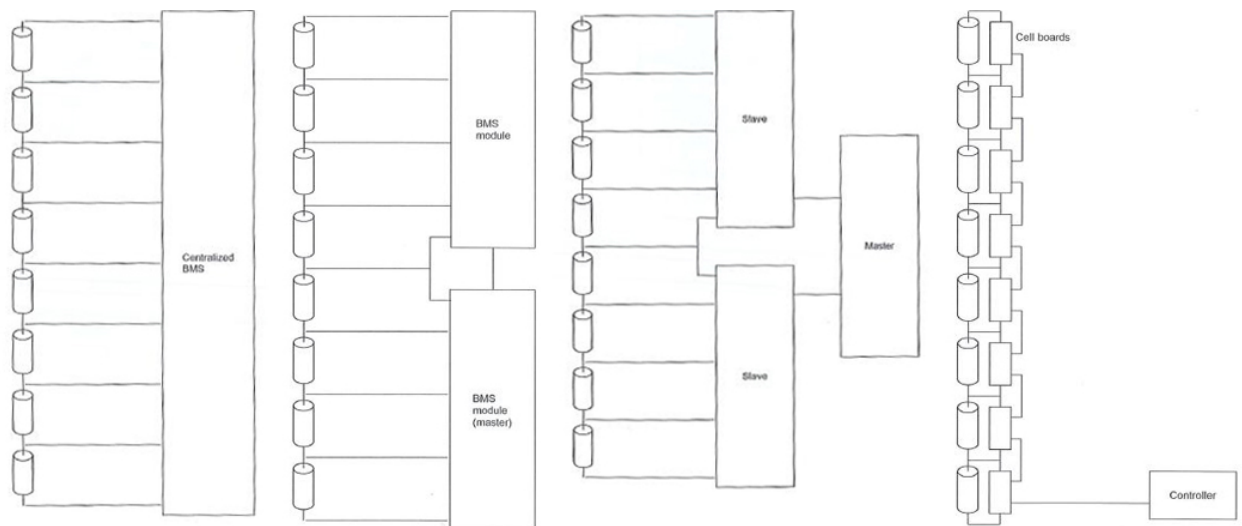
Akunhallintajärjestelmä välittää mittausdatat sekä ohjauskomennot ohjainlaitteille sekä sen alilaitteille. Järjestelmän ulkopuolisten laitteiden kanssa akunhallintajärjestelmä välittää mittausdatan, ohjauskomennot ja konfiguroinnin. Akunhallintajärjestelmä ohjaa tarvittaessa latauslaitteistoa sekä lämmönhallintajärjestelmää. Tiedonvaihtoa tapahtuu ajoneuvon ja älykkään sähköverkon välillä. Älykkääseen sähköverkkoon liittyy ajatus ajoneuvon akuston latauksen ohjaamisesta sekä akuston käyttämisestä puskurina sähköverkon kulutushuippujen tasaamisessa. Latauspalvelun tarjoajan näkökulmasta tarve kommunikoinnille on sähköenergian laskutus [21].

3.1.5 Lokikirjaus

Lokitiedostojen tekeminen on tarpeen laitteiston vikadiagnoosin ja järjestelmän toiminnan analysoimisen takia. Lokitiedostoja tarkkailemalla voidaan ennustaa akkukennoissa piileviä ongelmia. Lokitiedostot sisältävät mittausdatat, estimaatit sekä parametrit. Lokitiedostojen tallentamisen sijaan, akunhallintajärjestelmä voi myös lähettää saman datan ulkoiselle tallentimelle. [35]

3.2 Topologiat

Akunhallintajärjestelmän topologioilla saavutetaan kustannussäästöjä sekä suunnittelun vapauksia mm. akuston koon ollessa suuri. Mittaustarkkuuden kannalta on tarpeen käyttää lyhyitä mittausjohtoja. Luotettavuuden kannalta yksinkertaisuus ja tiedonsiirto ovat merkitseviä. Kustannusten kannalta elektroniikan yksinkertaisuus ja määrä on ratkaisevaa. Yleisimmät akunhallintajärjestelmissä esiintyvät topologiat ovat esitelty kuvassa 13.



Kuva 13: BMS-topologiat: keskitetty, modulaarinen, isäntä-orja ja hajautettu. [35]

Keskitetty akunhallintajärjestelmä on suoraan liitetty akkukennoihin. Keskitetyllä saavutetaan halvin tapa liittää kenno ohjainyksikköön: se on kompakti sekä vian ilmetessä on helppoa korjata yksi ohjainyksikkö. Yksi esimerkki keskitetyn topologian akunhallintajärjestelmästä: The Future's Flex BMS48. [35]

Modulaarinen on laajennus keskitetystä niin, että rinnalle on kytketty useampia ohjainyksiköitä ja yksi näistä on isäntä. Rinnakkaiset yksiköt tottelevat isäntäyksikön komentoja ja välittävät mittadatan isännälle digitaalisen väylän kautta. Modulaarisella topologialla saavutetaan helppo akuston laajennettavuus. Esimerkki modulaarisesta topologiasta: Reap Systems 14-cell digital BMS.

Isäntä-orja muistuttaa rakenteeltaan modulaarista, mutta lisänä on erillinen isäntäyksikkö. Isäntä-orja topologia käsittää modulaarisen-topologian ominaisuudet. Topologioiden ansiosta kennoyksiköt voidaan pelkistää vain tarpeellisia tehtäviä varten. Esimerkki: Black Sheep BMS Mini V3.

Hajautettu topologia käsittää kennoyksiköt ja ohjaimen. Kennoyksiköt kommunikoivat toistensa kautta ja ohjain yhden kennoyksikön välityksellä. Ohjain voidaan sijoittaa etäälle. Esimerkki: EV Power BMS-CM160-V6.

4 Tutkimuslaitteisto ja -menetelmät

4.1 Laboratorio testilaitteisto

4.1.1 Elithion BMS

Akun käyttöönotto tehtiin Elithion Lithiumate Pro-akunhallintajärjestelmällä. Lithiumatessa on kaikki tavanomaisen akunhallintajärjestelmän toiminnot. Lithiumatessa on kolme analogista lähtöä. Yksi lähdöistä ilmaisee varaustilan, CCL ohjaa laturia ja DCL ohjaa kuormituslaitetta. Ohjaimessa on tulot virta-anturille sekä häiriötilan havaitsemiseksi interlock-tulo. Kontaktoreiden ohjaamiseksi on kolme relelähtöä ja yksi näistä esilatausvastukselle. Jäähdytyksen ohjaamiseen ohjaimessa on PWM-lähtö tuulettimia varten. Lithiumate kommunikoi moduulien kanssa sarjavyhlän kautta. Ohjaimeen on liitettävissä 16-akkumoduulia. Moduulin sisältämää kennojen määrää ei ole rajoitettu. Lithiumate on konfiguroitavissa RS-232 väylän kautta. Ohjain voidaan liittää osaksi muuta järjestelmää Can-väylän kautta. Ohjaimeen on liitetty HVFE ("High Voltage Front End") - laajennuskortti. [35]

HVFE-laajennuskortti mittaa akuston kokonaisjännitteen ja virran sekä esilatausvastuksen jännitteen. HVFE ohjaa akun kontaktoreiden kytkemisen ulkoiseen piiriin. HVFE ajaa seuraavat testit ennen kontaktoreiden kytkemistä: varmistaa paketin eristyksen, tarkistaa kontaktorien, releiden ja esilatausvastuksen tilat sekä tarkistaa esilatausvirran noudattavan normaalia aaltomuotoa.

4.1.2 Akkupaketti

Akkupaketti (Kuva 14) on Aalto Yliopiston Ajoneuvotekniikan laboratorion omaa suunnittelua ja räätälöity tutkimustarpeita silmälläpitäen. Akkupaketti koostuu 14. sarjaan kytketystä akkumoduulista. Yhteensä 98 kennon sarjaan kytkentä tuottaa 362,6 voltin nimellisjännitteen (Taulukko 1). Yhden akkukennon kapasiteetiksi valmistaja ilmoittaa 40 Ah (0,5 C virralla 25 °C:n lämpötilassa). Akkukennot ovat Litium-ioni pussi-kennoja. Kennot ovat kemialtaan litium-magnaani-kobolttioksidea. Elektrolyyttiseparaattori on valmistettu polymeeristä. Kennovalmistaja on korealainen Kokam Co. [53]

Akkupaketti jakautuu kahteen osaan. Akut sijaitsevat paketin alaosassa. Yläosassa on akunhallintajärjestelmä sekä muu akkuelektroniikka (Kuva 15). Akkuelektroniikka käsittää Can-päätelaitenäytön, kontaktoreita, releitä, esilatausvastuksen, virta-anturin, erikokoisia sulakkeita sekä virransyöttökytkennät. Alaosassa olevat akkumoduulit on ladottu päällekkäin kahteen pinoon ja kytketty sarjaan. Moduulien sarjaan kytkennän erottaa kontaktori, mikä aukeaa virransyötön katketessa. Paketin yläosa on yhteydessä akkuihin kuparijohtimien kautta. Kuparijohtimet on kytketty akkupaketin ulkopuolella oleviin kaapeliliittämiin, mistä akku yhdistetään ympäristöön. Kaapelien yhdistämisen jälkeen kaksi, positiivisen ja negatiivisen liitimen läheisyyteen sijoitettua, kontaktoria erottaa akkupaketin ympäristöstä. Kontaktorit ovat kytkettynä releisiin, joita taas ohjataan akunhallintajärjestelmän re-

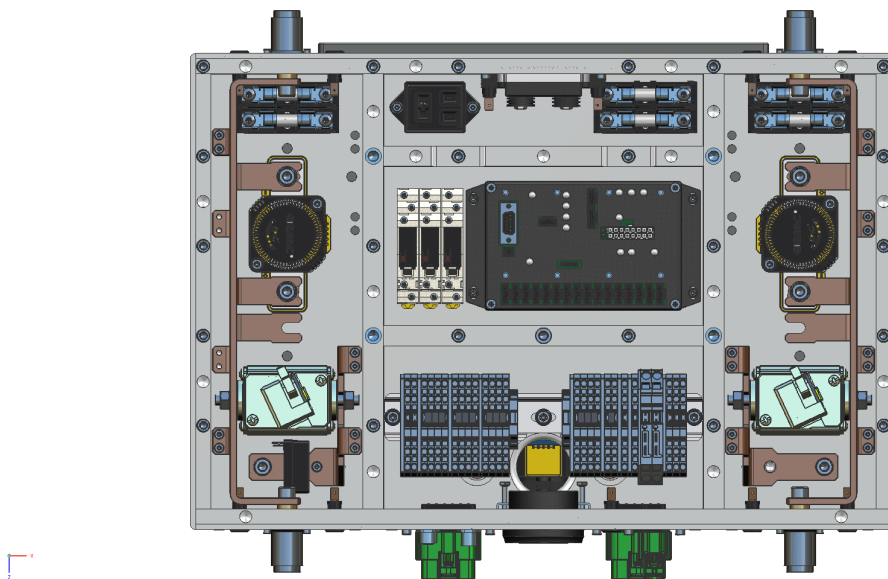
lelähdoillä. Kuparijohtimilla on lisäksi kaksi sulaketta akun napojen sekä liittimien välissä. Sulakkeilla suojataan akkua kuorman tai lähteen aiheuttamalta ylivirralla. Positiivisen liittimen kontaktorin rinnalle on kytketty toinen kontaktori. Tämä kontaktori kytkee esilatausvastuksen osaksi virtapiiriä. Esilatauspiiriä käytetään akun kytkemisessä ympäristöön, piirin suojatessa kytkemisvaiheen syöksyvirroilta. (Liite A)



Kuva 14: Ajoneuvotekniikan laboratoriossa on valmistettu Li-Ion akkupaketti.

Taulukko 1: Akkupaketin spesifikaatio [53]

Akku:		
Ominaisjännite:	362,6	V
Ominaisenergia	14,5	kWh
Maksimijännite:	412	V
Minimijännite:	265	V
Kenno:		
Ominaisjännite:	3,7	V
Kapasiteetti:	40	Ah
Energia:	148	Wh
Maksimijännite:	4,2	V
Minimijännite:	2,7	V
Maks. latausvirta	80	A
Maks. jatkuva purkuvirta	200	A
Maks. hetkellinen purkuvirta	400	A



Kuva 15: Akkupaketti ylhäältä

Akkukenno on ominaisjännitteeltään 3,7 V ja kapasiteetiltaan 40 Ah. Litium-magnaani-kobolttioksidi-polymeeri-pussikenno on mitoiltaan 250x215x10,7 mm. Kennon jännitealue vaihtelee 2,7 - 4,2 V välillä (Taulukko 1). Kokam lupaa kennolle yli 3000 purku-lataus-sykliä (80 % DOD).

Akkumoduuli on Kokamin valmistama seitsemän sarjaan kytketyn kennon paketointi. Moduulia suojaavat alumiinikuoret ja kannet liittyvät lujasti toisiinsa kansiruuveilla. Kennot on eristetty toisistaan ja samoin moduulin sisäosa on vuorattu ohuella vaahtomuovimaisella materiaalilla. Lisäksi kuoret on pulverimaalattu. Moduulissa on kaksi järeää liitintä kytkemistä varten. Jokaiseen kennoon on liitetty jännitemittausjohtimet. Lämpötila mitataan neljällä anturilla jokaiselta kennoparilta. Lämpötila anturit ovat DSC Electronicsin DS103FU(3435K) NTC - termopareja. Laboratoriossa moduulin etuosaan on valmistettu laajennusosa. Laajennusosa sisältää Lithiumate - kennokortin sekä tuulettimen kortin jäähdytystä varten. Kennokortti on liitetty kennojen jännite- ja lämpötilamittauksiin. Akkumoduulin nimellisjännite on 25,9 V ja kapasiteetti 40 Ah.

Kennokortti on Lithiumate - ohjaimeen liitettävä mittauskortti. Kennokortti mittaa jännitettä ja lämpötilaa seitsemän kennon ryhmältä. Kennokortissa on balansointivastukset jokaisen kennon yksittäistä balansointia varten. Balansointivirta kulkee jännitemittausjohtimien kautta. Balansointivirta on 100 mA. Isäntälaitteelle kommunikoidaan sarjaväylän kautta.

RM 1001 näyttö on RM Michaelideksen valmistama Can-väylään liitettävä päälaitte. Näytöltä voi lukea tärkeimmät tiedot akkupaketin tilasta, kuten jännite,

varaustila ja lämpötila. RM 1001 on 32-merkin kaksirivinäyttö. Näytössä on kolme valintanäppäintä. Näyttö on asennettu kiinteästi keskeiselle paikalle akkupakettia.

Gigavac gx 14 cab - kontaktoreita on akkupaketissa kolme. Kontaktori on mitoitettu kestäämään jatkuvaa 350 A virtaa ja 750 V jännitettä. Kontaktori on suljettu hermeettisesti turvallisuus suositusten mukaan. Kontaktoria ohjataan 24 V jännitteellä. Jännitejohtimien lisäksi kontaktorissa on kaksi oloarvojohdinta.

Kolme Omron G3R puolijohde-relettä on kytketty akunhallintajärjestelmän sekä kontaktoreiden välille. Releet ohjaavat kontaktoreita ja akunhallintajärjestelmä releitä. Releet suojaavat akunhallintajärjestelmän elektroniikkaa kontaktoreiden suhteellisen suurelta ohjausvirralta. Releessä on oloarvon ilmoittava merkinantoledi. Releiden jännitteenkestoksi luvataan 4000 V.

Panasonic AEV110242 on ajoneuvokäyttöön tarkoitettu rele. Rele on mitoitettu 10 A virralle sekä 400 V jännitteelle. Relettä ohjataan 24 V ja se on kytketty ohjaamaan esilatauspiiriä. Releen kontaktikengät on eristetty vetykaasulla kipinäoinnin estämiseksi.

Vishay Sfernice RPS 500 on tehovastus. Vastusta käytetään esilatausvastuksena liitettäessä akkua ulkoiseen laitteeseen. Vastuksen resistanssi on 470 ohmia ja jatkuva tehonkesto 500 W. Vastusta jäähdytetään jäähdytyslevyn kautta.

Tamura L03S hall-efekti anturilla mitataan akun läpi kulkevaa virtaa. Anturin mitta-alue ulottuu 400 A asti. Anturin tarkkuudeksi ilmoitetaan yksi prosenttiyksikkö tarkoittaen 4 A virhettä täydellä skaalalla. Virta-anturin syöttöjännite on ± 15 V.

Sulakkeita on kahdenlaisia. Kaksi Ferraz Shawmut - sulaketta suojaavat akkupakettia virran ylittäessä 400 A. Sulakkeiden jännitteen kesto on 550 V. Yleismittarille tarkoitetut mittaussjohdot on suojattu 440 mA Littelfuse - sulakkeilla. Työssä käytettiin myös 2 A Littelfuse - sulakkeita.

DSC Electronics DS103FU(3435K) NTC-termopari. Käytetään sekä Lithium-maten lämpötilamittauksissa että Beckhoffin lämpötilamittauksissa. Anturin beta-toleranssi ja keskilämpö ovat yhden prosentin luokkaa.

Ebmpapst-tuulettimia käytetään akkukennojen jäähdyttämiseen. Tuulettimen käyttöjännite on 24 V ja maksiminopeus 9700 rpm. Tuulettimien nopeus on portaattomasti ohjattavissa PWM-signaalilla.

Syöttöjännitepuoli jakautuu 12 V ja 24 V. Akunhallintajärjestelmä tarvitsee käyttöjännitteeseen 12 V. Kaikki muut komponentit käyttävät 24 V. Jännitetasen alennus tehdään zener-diodi-regulaattorikytkennällä.

4.1.3 Elithion mittaukset ja vertailuestimaatit

Kappaleessa kerrotaan mitä valmistaja ilmoittaa Lithiumate-akunhallintajärjestelmän mittauksista ja estimaateista.

Jännitteet mitataan jokaiselta kennolta ja yhtäaikaaisesti jokaiselta moduulilta. Jännitekeskiarvo sekä jänniteaikakeskiarvo lasketaan maksimi- ja minimikenojännitteistä. Lithiumaten sisäisessä prosessoinnissa käytetään keskiarvostettuja jännitearvoja. Kokonaisjännite saadaan kennojännitteiden summasta. Taulukossa 2 valmistajan sivuilta poimitut tiedot jännitemittauksen tarkkuudesta.

Taulukko 2: Jännitemittaus spesifikaatio [35]

Mittaustarkkuus:	$\mp 10-15$	mV
Mittausresoluutio:	19 (7-33)	mV
CAN-väylä resoluutio:		
Kennojännite:	10	mV
Kokonaisjännite:	1	V

Lämpötila mitataan jokaisen kennon pinnalta yhdestä pisteestä. Päälimmäistä ja alimmaista anturia lukuun ottamatta anturit sijaitsevat keskellä etureunassa kennojen välissä. Lämpötilan keskiarvo sekä aikakeskiarvo määritetään kuumimman ja kylmimmän kennon lämpötilasta. Lämpötilat mitataan NTC-termistoreilla.

Akun virran mittaamiseksi Lithiumate tarjoaa neljä eri liitäntä vaihtoehtoa: 5- tai 15-voltin analogia portit, Can-väylän tai HVFE-laajennuskortin virta-anturikohtion. Laboratorion järjestelmässä virta-anturi on liitetty Can-väylään. Virta-anturi on hall-efektiin perustuva Tamura L03S.

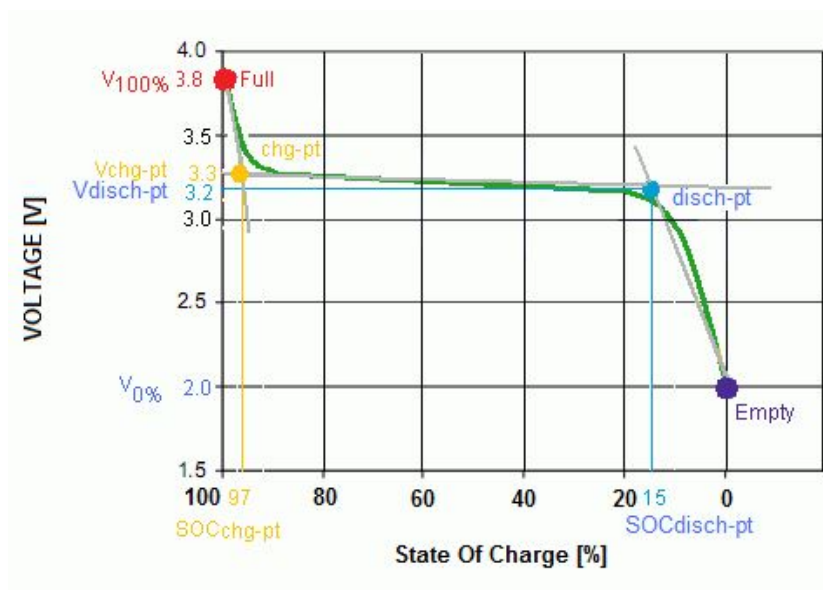
Purkusyvyys (DOD) ilmaisee akusta puretun energian määrän (Ah). Purkusyvyys lasketaan integroimalla akun läpi kulkevaa virtaa. Purkusyvyys on nolla akun ollessa täydeksi ladattu. Akku tulkitaan täydeksi kun latautunein kenno saavuttaa akun maksimijänniterajan.

$$DOD = \int I_{\text{batt}} dt; \quad (12)$$

$$If(V_{\text{cell-max}} > V_{\text{cell-chgd}}); \quad (13)$$

$$DOD = 0; \quad (14)$$

Varaustaso (SOC) ilmaisee akun varaustilaa prosentteina sen kokonaisvarauksesta. Elithion määrittää varaustason kaksivaiheisesti: virtaintegraatioon perustuvalla ja jännitemuunnos-menetelmillä.



Kuva 16: SOC:n määrittys jännitemuunnoksen ja virtaintegraation perusteella. [35]

Jännitemuunnos menetelmässä varaustaso määritetään mitatun jännitteen perusteella. Mitattua jännitettä verrataan taulukoituhiin varaustilan ja jännitteen arvoihin. Jännitemuunnos soveltuu käytettäväksi silloin kun varaustilan muutoksesta seuraa selvä muutos jännitteessä. Menetelmää sotkee jänniteominaiskäyrän muutos lämpötilan ja virran muuttuessa.

Virtaintegrointiin perustuva menetelmä summaa kaiken akkuun ladatun ja purettu virran varaustason määrittämiseksi. Menetelmä tarvitsee lähtötiedokseen akun sen hetkisen varauksen. Virtaintegroinnin tulos on tarkka mittaustarkkuuden puitteissa. Ongelmaksi muodostuu vaeltaminen, eli mittausvirheen summautuminen integroitaessa.

Menetelmät yhdistämällä saavutetaan kokonaisuutena tarkempi tulos kuin kummallakaan erikseen. Jännitemuunnosta käytetään kennon jännitteen ylä- ja alarajoilla. Virtaintegrointiin perustuvaa varaustason määrittystä käytetään muissa tapauksissa. Menetelmä ottaa huomioon litium-ioni akun ominaisen jännitekäyrän muodon, missä keskivaiheella varaustason muuttuminen ei juurikaan näy jännitetason muutoksena. Kuva 16. [35]

Kapasiteetin määrittämiseksi täydeksi ladattu akku on purettava tyhjäksi ja saatu lukema asetetaan Lithiumateen parametrina.

Terveystila (SOH) on estimaatti akkukennon nykyisestä suorituskyvystä verrattuna tehtaan spesifikaation mukaiseen uuteen akkukennoon. Terveystila ilmaistaan prosentteina suhteessa terveeseen uuteen akkuun. Elithion määrittää terveystilan

hetkellisen kapasiteetin ja kennon sisäisen resistanssin perusteella. SOH-algoritmi ei toimi, jos akkua ei ladata täyteen ja pureta tyhjäksi kertaakaan.

Lithiumate laskee jokaiselle akkukennolle **sisäisen resistanssin**. Resistanssia kutsutaan dynaamiseksi resistanssiksi (Kaava (15)). Resistanssin arvoa lasketaan virran muutostilanteiden aikana näytepisteiden perusteella. Kahdesta näytepisteestä laskettu jännitteen ja virran kulmakertoimen arvo kuvaa resistanssia. Vakiovirralla resistanssin määrittäminen ei onnistu. Akkupaketin resistanssin keskiarvo lasketaan eniten ja vähiten varautuneiden akkumoduulien mukaan. Akkupaketin kokonaisresistanssi on summa kaikista kennonresistansseista.

$$R = \frac{\Delta U}{\Delta I} \quad (15)$$

4.2 Tutkimusmenetelmät

Luku käsittelee akkupaketin käyttöönottamista. Akkupaketin käyttöönotto sekä mittaukset tehdään hyväksi havaitun työjärjestyksen mukaisesti. Testien tarkoituksena on varmistaa akkupaketin luotettava toiminta kytkentöjen, mittausten sekä estimaattien osalta.

4.2.1 BMS Käyttöönotto

1. Ohjelmointi

Ohjaimeen ohjelmoidaan järjestelmään sopiva ohjelmisto. Ohjelmisto saadaan valmistajalta. Puutteiden tai lisäominaisuuksien ilmetessä valmistajalta pyydetään päivitettyä ohjelmistoversiota.

2. Konfigurointi

Akunhallintajärjestelmän konfiguraatio käsittää kolme kokonaisuutta: akusto, järjestelmä sekä viestiliikenne.

Akuston konfigurointi jakautuu kennon ja akkupaketin konfigurointiin. Kennotason konfigurointi käsittää kennon ominaisuuksien määrittämisen, esimerkiksi jännite ja lämpötila käyttäytymiset. Akkupaketin konfigurointi huomioi kennojen lukumäärän ja miten ne ovat kytketty toisiinsa. Tässä määritellään myös paketin toimintarajat, kuten maksimivirta ja jännite.

Järjestelmän konfiguraatio käsittää akkuelektroniikan, toimilaitteiden, antureiden, balansoinnin, kommunikoinnin, käynnistymisen sekä suojauksen asetuksista. Kontaktoreiden, releiden sekä laturin ohjaus määritetään.

Viestiliikenteen konfigurointi on vaihe missä akunhallintajärjestelmän kanssa kommunikoivat laitteet konfiguroidaan kommunikoimaan sen kanssa.

3. Kytkenät sekä IO-testaus

Ennen varsinaista käyttöönottoa on tärkeä tarkistaa kaikki liitännät huolella. Tarkastettavia asioita ovat signaalijohdotusten oikeellisuus, syöttökaapeleiden sekä tietoliikenneväylien kytkennät.

Lithiumaten sisään- ja ulostulot tarkistetaan kytkentöjen tarkistamisen jälkeen. Ulostuloarvot mitataan ja tarkistetaan että ne vastaavat järjestelmän tilaa. Lithiumatessa ulostulot voidaan keinotekoisesti pakottaa haluttuun tilaan. Sisääntuloihin syötetään manuaalisesti heräte ja seurataan, että järjestelmässä tapahtuu toivottu tilan muutos.

4. Kytkeminen kuormaan

Kuormaan kytkemisellä tarkoitetaan akkupaketin liittämistä kuvan (18) lataus- ja purkulaitteistoon. Käytännössä akkupaketti kytketään Elfa-moottoriohjaimen välipiiriin. Kytkeminen on riskialtista välipiirin kapasitiivisuuden takia sekä suuren jännite-eron vuoksi. Kun akkupaketti kytketään, kapasitiiviset komponentit latautuvat ja ottavat energiansa akusta. Kapasitiivisuus aiheuttaa suuria syöksyvirtoja. Pienen resistanssin vuoksi syöksyvirrat voivat olla hetkellisesti tuhansien ampeerien suuruisia. Syöksyvirrat ovat erittäin haitallisia ja aiheuttavat helposti komponenttien rikkoutumisia.

Syöksyvirtojen välttämiseksi akkupaketissa on esilatauspiiri. Piirin esilatausvastuksen resistanssi rajoittaa kytkemishetken virran niin että syöksyvirtoja ei esiinny. Akunhallintajärjestelmä ohjaa kontaktoreiden toimintaa. Ohjain huolehtii siitä, että akku kytketään aina esilatauspiiriin kautta muuhun järjestelmään. Ennen kontaktoreiden kytkemistä Lithiumate tarkistaa kaikkien kytkentään osallistuvien komponenttien kunnon. Havaitessaan puutteita kytketyminen keskeytyy.

Yllä esitettyjen vaiheiden jälkeen akkupaketti on valmis varsinaisia testejä varten.

4.2.2 Akkupaketin validointitestit

Luvussa kerrotaan tehtävät mittaukset testaamiseen soveltuvalla akkupaketille. Akkupaketin jännite ja virta mitataan Hioki-tehoanalysaattorilla vertaavan mittausdatan saamiseksi.

5. Akun lataus ja esibalansointi

Akkupaketin ensimmäinen täyteen lataus tehdään Genesys-laturilla kuvan 17 latausjärjestelyin. Latausvirran ohjearvona on 2 A ja jänniteohjeena 417 V. Latauksen yhteydessä akun kennot esibalansoidaan. Lataukseen ja balansointiin kuluva aika mitataan. Tavoiteltuna lopputuloksena on täysin balansoitu ja täyteen ladattu akku. Testin yhteydessä saadaan ensikokemuksia Lithiumaten toiminnasta latauk-

sen aikana. Balansointi on loppujännite-algoritmin mukainen. Asetettu balansoinnin kynnysarvo on 4,17 V ja jännitteen huippuarvo 4,25 V.

6. Akun lataus ja purkaminen

Täydeksi ladattu ja balansoitu akku liitetään kuvan 18 laitteistoon. Akku puretaan tyhjäksi ja ladataan sitten täydeksi vakiovirralla. Käytetyt virran arvot ovat 0,5C, C, 2C, 3C, 4C, 6C. Latauksen maksimivirta on 2C. Aina purkamisen ja latauksen päätteissä pidetään taukoa 30 minuuttia kennojännitteiden tasaantumiseksi [33].

Testien tarkoituksena on todeta akkukennojen normaali ja turvallinen käyttäytyminen vakiovirtakokeilla. Lisäksi halutaan todeta akunhallintajärjestelmän suoriutuminen testien yhteydessä. Kolmantena halutaan todeta akuston normaali käytös ja suoriutuminen kokonaisuudessaan kuvattujen testien aikana. Ensimmäisen vakiovirtalatauksen ja purkamisen yhteydessä akunhallintajärjestelmä oppii tuntemaan akun kapasiteetin.

7. Akun kuormitustestit ja estimointihavainnot

Tasavirtatestien jälkeen akustoa kuormitetaan dynaamisella kuormalla. Laitteisto on kuvan 18 laitteisto. Akkua kuormitetaan portaittain nousevalla ja lopulta laskevalla tasavirtakuormalla.

Testien tarkoituksena on todeta akkukennojen normaali ja turvallinen käytös dynaamisen kuorman aikana. Lisäksi halutaan todeta akunhallintajärjestelmän suoriutuminen testien yhteydessä. Testien tarkoituksena on myös selvittää akunhallintajärjestelmän mittausten ja estimaattien tarkkuuksia.

8. Akun syklitestit

Akustoa kuormitetaan työkonesyklillä. Sykli kuvaa kaivoslastarin yhden työkierron aikana kuluttama tehoa [54][55]. Laitteistona on kuvan 18 laitteisto.

Testien tarkoituksena on todentaa että akusto kykenee sille tarkoitettuun käyttö-tarkoitukseen. Testien lopuksi arvioidaan akkupaketin soveltuvuutta ajoneuvossa.

5 Käyttöönotto ja mittaukset

5.1 Akuston lataus- sekä testilaitteisto

Työtä varten rakennettiin kaksi laitteistoa akun lataamista, kuormittamista sekä mittaamista varten. Kytkentäkaaviot on esitetty kuvissa 17 ja 18. Laitteet ja ohjelmistot esitellään ennen varsinaisia testauslaitteistoja.

MicroAutoBox on dSpace:n kehittämä tietokoneyksikkö prototyypisovelluksia varten. MicroAutoBox sisältää paljon digitaalista ja analogista I/O:ta sekä väyläliitäntöjä kuten CAN, LIN, K/L Line ja FlexRay. Se on kompaktin kokoinen ja päällystetty alumiiniseoskuorilla. MicroAutoBoxia voidaan käyttää itsenäisenä ohjainyksikkönä sekä voidaan liittää reaaliaikakäyttöliittymään. Prosessori on 800 MHz ja 16 MB kapasiteetti ajonaikaisen datan tallentamiseksi.

Control Desk on dSpace:n reaaliaika prosessinvalvonta sovellus. Control Deskillä luodaan graafinen käyttöliittymä. Näkymästä voi luoda haluamansa näköisen. Käyttöliittymään liitetään reaaliaikasovelluksen muuttujia seuraamista tai ohjaamista varten. Control Deskillä luotiin käyttöliittymänäkymä lataus- ja kuormituslaitteiston ohjaamiseksi sekä seuraamiseksi. Kuvat käyttöliittymästä on esitetty liitteessä C ohjausnäkyä sekä liitteessä D mittaussäkyä.

Ohjausnäkyssä on jokaisen ohjattavan laitteen hallintänäkyä ryhmitelty erikseen. Ohjausnäkyä sisältää hätä-seis-napin, minkä aktivoituessa moottorit komennetaan ei-aktiiviseen tilaan. Moottoriletkaa voidaan ajaa manuaalisilla nopeus- ja vääntöohjeilla. Moottoriletkaa voidaan ajaa myös täysin automaattisesti, moottoreiden toteuttaen ennalta ohjelmoidun kuormitusrytmin. Ohjausnäkyä voidaan ohjata Lithiumaten kontaktoreita. Tärkeimmät mitta-arvot on tuotu näkyyn. Ohjausnäkyä sisältää myös merkkilamppuja. Lampun väri ilmaisee missä tilassa laite tai mittausarvo on. Ohjattavan laitteen kohdalla lamppu kertoo onko viestiliikenne kunnossa. Mittausarvon kohdalla väri ilmaisee onko mitattu arvo sallittujen rajojen sisäpuolella, esimerkiksi nestekierron lämpötila.

Mittausnäkyä sisältää ainoastaan Lithiumaten lähettämää viestiliikennettä. Kennomittaukset on pyritty visualisoimaan erojen havaitsemisen helpottamiseksi. Mittausnäkyssä on kuvattuna akkupaketti, missä kennoinformaatio esitetään sille kuuluvalla paikalla. Jännitteen ja lämpötilan väri muuttuu mittausarvon myötä. Merkkilamput indikoivat akunhallintajärjestelmän tilaa. Käyttöliittymän kautta voi käynnistää ja keskeyttää mittausarvojen lokitiedostoon tallentamisen.

Simulink on Matlabin ympäristö simulointiin ja malli-pohjaiseen suunnitteluun sekä dynaamisille että sulautetuille järjestelmille. Simulink osaa generoida mallinsa C tai C++ kieliksi ja käytettävissä on lukuisia kääntäjiä. dSpace tarjoaa reaaliaikasovellus rajapinnan (RTI) simulinkille.

Simulinkillä toteutettiin järjestelmän ohjaus- sekä mittausmalli akkupaketin testejä varten (Liite E). Simulink-malli toteutettiin osaksi laboratoriossa jo aikaisemmin toteutettuun ohjaus- ja mittausmalliin. Työssä simulink-malliin ohjelmoitiin Can-rajapinta. Can-viestien kuvaus tehtiin Vectorin CANdb++ -editorilla. Control Deskin-käyttöliittymään päivittyvät Lithiumaten lähettämät viestit ja vastaavasti kontaktorin ohjausviestin voi lähettää käyttöliittymästä käsin.

Siemens Elfa on ajoneuvokäyttöön suunniteltu vesijäähdytteinen moottoriohjain. Moottoriohjain koostuu kahdesta yksiköstä DICO:sta ja DUO:sta. Moottoriohjaimen liitetty DICO (Digital Input Control) on yhdyskäytävänä väylien välissä. Se vastaanottaa SAE J1939 CAN viestit ja tulkitsee ne Siemensin DCAN protokollan viesteiksi. Duo rakentuu tasajännitevälipiiristä, kahdesta vaihtosuuntaajasta sekä jarruvastusohjaimista.

Työn alkaessa Elfa oli käyttökuntoinen, mutta DUO:n vaihtosuuntaajista vain toinen toimi. Laboratorion erään toisen tarpeen vuoksi Elfan toimintaa haluttiin tutkia. Tämän seurauksena Elfan ohjainsovellus ja molemmat vaihtosuuntainohjaimet ohjelmoitiin uudestaan. Elfan kaikki 500 parametria konfiguroitiin myös uudestaan. Diplomityön testilaitteistoa rakentaessa Elfa oli käyttökuntoinen, mutta konfiguroitu toisenlaiselle käytölle laboratoriossa. Työn aikana tasajännitevälipiirin jännite ja suojaus parametrit konfiguroitiin uudestaan akkupaketille sopivaksi. Ohjelmointi ja konfigurointi tehtiin Siemensin Flash Loader ja Siadis Expert-työkaluilla.

Siemens 1PV5135 on 67 kW induktiomoottori. Se on ajoneuvosovelluksiin soveltuva: vesijäähdytteinen ja tiiviisti alumiiniseoskuorilla suojattu.

Työn aikana toiselle moottoreista tehtiin huollon jälkeinen käyttöönotto. Uudelleen käämityn moottorin toiminta testattiin ajamalla sitä ilman kuormaa molempiin suuntiin. Ongelmia ei ilmennyt edes lähellä käyntinopeuden maksimia. Moottorin kunto todettiin kelvolliseksi myös laboratorion muissa diplomityöhön liittymättömissä kokeissa.

Vacon NXP on teollisuuskäyttöön suunniteltu ilmajäähdytteinen taajuusmuuttaja. Laboratoriossa NXP on konfiguroitu ohjaamaan toista Siemens moottoria. Ohjausmoodit ovat nopeus- tai momenttisäätö. Tarkemman ohjattavuuden takia moottorin alkuperäinen enkooderi on korvattu tarkemmalla enkooderilla. NXP:tä ohjataan Can-väylän ylitse.

Vacon NXC AFE on ilmajäähdytteinen verkkovaihtosuuntaaja. NXC AFE on varustettu aktiivisella tasasuuntaimella tuottaen 650 V jännitteen tasajännitepuolelle. Tasasuuntaimen ansiosta NXC AFE on kykenevä siirtämään tehoa myös takaisin verkkoon.

CoolingBox on ”commonrail” -tyyppinen laboratorio jäähdytysjärjestelmä. CoolingBoxiin voidaan liittää kuusi jäähdytettävää laitetta. Sisäinen vesikierto jäähdy-

tetään lämmönvaihtimen kautta kylmällä raanavedellä. Vesikiertoa pyörittää sähköinen vesipumppu. Lähdöissä ja tuloissa on mekaaniset sekä sähköisesti ohjatut venttiilit. Jäähdytyskierron kautta kulkeneen veden lämpötila sekä paineen muutos voidaan mitata. Myös veden virtausnopeus on mitattavissa ja säädettävissä. CoolingBoxia ohjataan SAE J1939 Can-väylän yli. Toimilaitteita ohjaa kutakin oma ohjainyksikkönsä. Mittaustiedot antureilta välitetään CANopen-väylän ylitse.

Powerfinn PAC 3200 on 3200 W hakkuriteholähde. Powerfinn on jännite- ja virtasäädettävä CCCV-laturi. Laboratoriossa teholähde on asennettu räkkiin ja asetettu tarjoamaan 24 V lähdejännitettä käytettävien laitteiden elektroniikalle.

Genesys GENH600-1.3 on 780 W laboratorio teholähde. Se on jännite- ja virtasäädettävä CCCV-laturi. Ulostulojännite on säädettävissä 0-600 V ja virta 0-1,3 A. Genesystä on mahdollista ohjata sarjaväylän kautta. Virta on rajoitettavissa analogiatulon (0-5 V) kautta.

Hioki 3390 tehoanalysointilaite on erityisen soveltuva mittamaan sähköistä tehoa tasavirrasta aina moottorikäyttöjen taajuuksiin asti. Hiokissa on neljä mittauskanavaa jännitteelle ja virtamittaukselle. Hiokin tarkkuudeksi luvataan $\pm 0,05$ % ja käytetyn virta-anturin tarkkuudeksi luvataan $\pm 0,5$ % ja $\pm 0,05$ % täyden skaalan tasavirtamittauksella. Työssä Hiokilla mitattiin akkupaketin jännitettä ja virtaa.

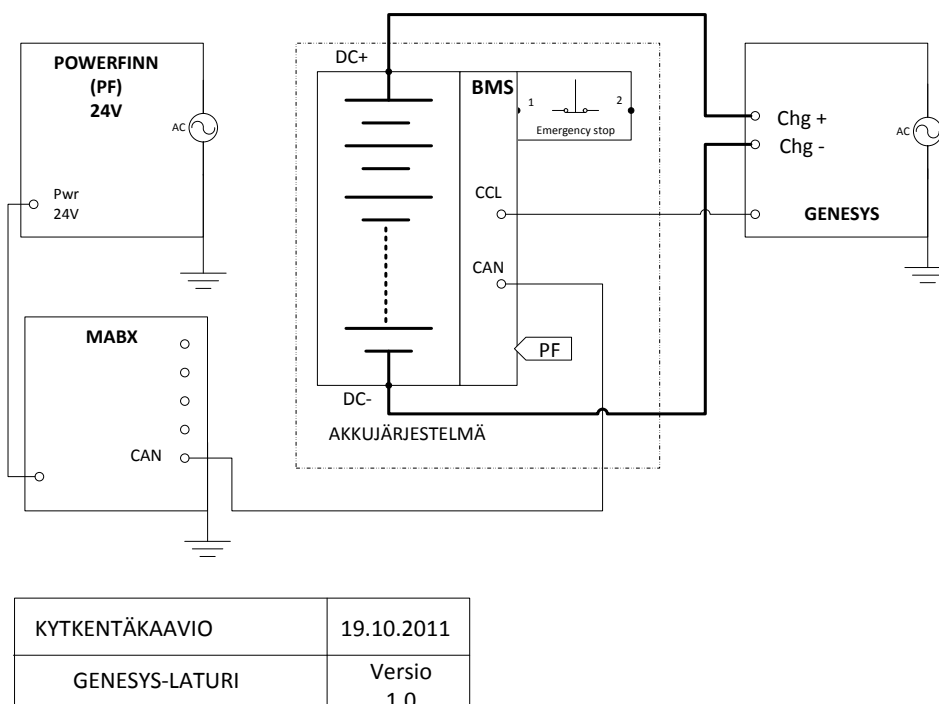
Beckhoff on Beckhoff Automation GmbH & Co. valmistama kenttäväylään kytkettävä mittalaite. Työn Beckhoff on liitetty Can-väylän kautta MicroAutoBoxiin. Työssä käytettävät KL3314-lohkot mittaavat termopareja. KL3314:n resoluutioksi ilmoitetaan $\pm 0,1^\circ\text{C}$:tta bittinä kohdin ja mittausrakenteeksi korkeintaan 0,5 %.

5.1.1 Latauslaitteisto

Akuston käyttöönottoa varten rakennettiin kuvan 17 mukainen latauslaitteisto. Työssä Genesys-laturia ohjattiin asettamalla sille jännite- ja virtaohjeet. Käytännössä laturi syöttää virtaa akustoon maksimivirralla, mitä akunhallintajärjestelmä rajoittaa tarpeen mukaan. Lithiumate aloittaa latausvirran rajoituksen havaitessaan akuston tai akkukennon jännitteen nousseen määrätyn rajan yli. Virta rajoitetaan Lithiumaten analogisella CCL-jänniteohjeella. MikroAutoBox lukee Can-väylältä Lithiumaten lähettämää mittaustietoa. Powerfinn-tasajännitelähde tuottaa 24 V käyttöjännitteen tarvittaville laitteille.

5.1.2 Lataus- ja kuormituslaitteisto

Akun käyttöönoton todentamiseksi rakennettiin kuvan 18 mukainen lataus- ja kuormituslaitteisto. Rakenteensa vuoksi testilaitteisto soveltuu myös akun dynaamisen käytön tutkimiseen. Testilaitteistolla akun kuormavirta voidaan käytännössä säätää pienistä virroista aivan sen maksimiin 320 A asti. Samoin latausvirta on säädettävissä.



Kuva 17: Akkupaketin latausjärjestelmä

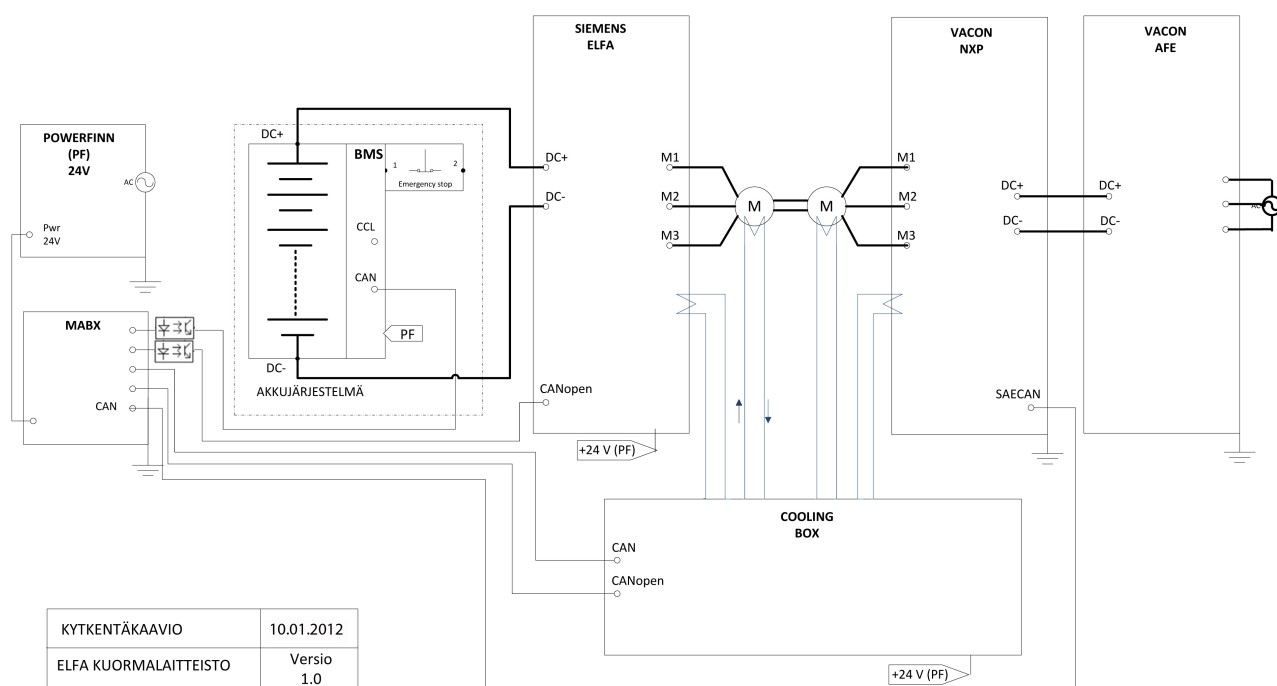
Akku on kytketty Siemens Elfa-vaihtosuuntaajaan. Moottorina on Siemens induktiomoottori. Moottoria vasten on kytketty samanlainen moottori, mitä ohjataan Vacon NXP taajuusmuuttajalla. NXP on yhteydessä 650 V DC-linkin kautta Vacon NXC AFE-verkkovaihtosuuntaajaan. Moottoriletkassa toinen moottori jarruttaa toisen moottorin pyörimistä. Ideana on tuottaa halutun kaltainen kuorma jarruttavan moottorin avulla. Akkua purettaessa Duon moottoria ajetaan nopeusohjeella. Vastakkainen moottori tuottaa kuorman momenttiohjauksen avulla. Sähkömoottorin tuottaman momentin suhde moottorin kuluttamaan virtaan on lähes suoraan verrannollinen. Moottorin momenttiohjauksella voidaan näin tuottaa halutun kaltainen virta akun purkamiseksi tai lataamiseksi.

Kuorma voi olla staattista tai dynaamista. Staattisessa kuormassa jarrutusmomentti pidetään vakiona. Dynaaminen kuorma kasvaa ja vähenee määrättyinä ajan hetkinä. Se voi sisältää myös vakiokuorma hetkiä. Dynaaminen kuorma voi olla esimerkiksi työkoneesta mitattu tehonkulutus yhden työkierron kuluessa.

Akkua purkaessa energia kulkeutuu verkkovaihtosuuntaajalle ja verkkovaihtosuuntaajalta valtakunnanverkkoon. Akkua ladattaessa energia kulkee valtakunnanverkosta akulle.

MikroAutoBox on viiden Can-väylän kautta liitetty järjestelmään. Järjestelmä on ohjattavissa MikroAutoBoxin avulla. MikroAutoBox on liitetty tietokoneeseen dSpace sarjaväylän kautta. Koko järjestelmän valvonta ja ohjaus hoidetaan Control Desk-reaaliaika käyttöliittymän avulla.

Järjestelmän komponentteja jäähdytetään CoolingBoxin avulla.



Kuva 18: Akkupaketin lataus- ja kuormituslaitteisto

5.2 Mittaukset

5.2.1 BMS käyttöönotto

1. Ohjelmointi

Lithiumate ohjelmoidaan Microchip PICkit 2 - ohjelmointilaitteella. Ohjelmointilaitte kytketään tietokoneeseen usb-väylän ja Lithiumateen ohjelmointikaapelin kautta. PICkit ohjelmiston avulla hoidetaan ohjelmointiasetukset kuntoon ja ylikirjoitus käynnistyy napin painalluksesta. Ohjelmalla voidaan myös ladata käytössä oleva nykyinen ohjelma talteen. Ohjelmakoodia ei ole saatavissa ja kaikissa muutoksissa on informoitava Elithionia, joka hoitaa ohjelmamuutosten tekemisen. Itse ohjelmointi hoidetaan Skypen välityksellä ja Elithion Remote Access - etäyhteystyökalulla.

Lithiumate on ohjelmoitu kahteen kertaan lopputyön tekemisen aikana. Päivitykset olivat tuulettimien PWM-taajuuden muuttaminen, lämpötilan sovitus sekä esilataus ajan kasvattaminen. Tuulettimien nopeus säätty 2-5 kHz:n välillä, missä alkuperäinen taajuus oli liian suuri. Taajuus muutettiin 4 kHz:n. Tuulettimilla on nyt kaksi nopeutta: tyhjäkäynti ja nopeakäynti. Alun perin Lithiumate tulkitse NTC-termoparien lämpötilamittaukset toisen anturidatan perusteella. Ohjelma päivitettiin vastaamaan DSC Electronicsin DS103FU (3435K)-datalehteä. Akkupaketin kytkemisvaiheen aikana havaittiin esilatausparametrin maksimiajan olevan riittämätön turvallisen kytkemisen saavuttamiseksi. Käytettävällä esilatausvastuksella tarvitaan toistakymmentä sekuntia turvallisen kytkemisen takaamiseksi. Aikaisempi esilatausparametrin 2,55 sekunnin maksimiaika korvattiin 255 sekunnilla.

2. Konfigurointi

Elithion Lithiumate konfiguroidaan pääte-emulaattori ohjelmalla puTTYlla sarjavyölyn yli. Parametriasetukset voi tallentaa parametritiedostoksi ja tiedoston voi suoraan ladata laitteeseen.

Lithiumateen asetettiin akkukytkentä: 98 sarjaan kytkettyä kennoa, 14 moduulia sekä 7 kennoa kussakin moduulissa. Kennojännitteiden ylä- ja alarajat asetettiin sekä balansointitasoksi 4,17–4,20 Volttia. Lithiumate asetettiin avaamaan kontaktorit automaattisesti heti vikatilan havaittua. Lithiumate sisältää valmiiksi ohjelmoidut Can-väylä viestit. Viestiliikenteen nopeudeksi asetettiin 500 kbs ja viesti Id:n kantaluksi 700. Lithiumate asetettiin Can-väylän kautta avaamaan ja sulkemaan kontaktorit. Viestin vastaanottaminen käynnistää toimintosarjan, missä esilatauspiiri kytketään ennen varsinaisten kontaktoreiden kytkeytymistä. Työn edistyessä todettiin, että konfigurointia sai päivittää useampaan kertaan.

RM 1001 näyttö konfiguroitiin Can-viestiliikenteelle soveltuvaksi. Konfigurointityökaluna käytettiin RM Display Configurator-ohjelmaa. RM CAN Device Monitor-ohjelmalla toteutettiin näytön viestiliikenteen virheenkorjaus ja testaus. RM 1001 näytölle luotiin looginen siirtymisvalikko. Näkymästä toiseen siirrytään painamalla

nuolinäppäimiä. Yksityiskohtaisempi tieto mitta-arvoista löytyy alavalikoista johon siirtyminen tapahtuu keskinäppäintä painamalla. Näytöltä voi lukea: kokonaisjännitteen, virran, lämpötilan, resistanssin, SOC, DOD, SOH, lataus rajan, purkamisrajan, vika- ja varoituskoodit, käynnissä oloajan, maksimi- ja minimiarvot kenno jännitteistä, lämpötiloista sekä resistansseista.

3. Kytkennät sekä IO-testaus

Kaikki virransyöttö-johdotukset, rele- ja kontaktorikytkennät tarkistettiin yleismittarilla. Virran kytkemisen jälkeen mitta-arvojen todettiin olevan kunnossa. Balansointikortit tarkistettiin yleismittarilla mittaamalla valmistajan ohjeiden mukaan. Liitântöjen todettiin vastaavan kytkentäkaaviota (Liite F).

4. Kytkeminen kuormaan

Akkupaketin kuormaan kytkeytyminen epäonnistui ensimmäisellä kerralla. Kytkeytymisen aikana esilatausvastus paloi poikki sekä kolmen Gigavac-kontaktorin kontaktipinnat hitsautuivat yhteen. Tapahtuneen analysointi selvitti, että esilatausvastus oli alimittainen kestäämään kytkemishetken tehoa sekä esilatauspiiriä tarkkailevat suojaustoiminnot eivät kaikilta osin olleet käytössä.

Kontaktoreiden rikkoutuminen oli edennyt seuraavasti: Kytkemisen aikana esilatausvastus paloi poikki, minkä johdosta välipiirin kontaktoreiden lataamiseen menevä virta ei rajoittunut. Korkea virta hitsasi kontaktoreiden kengät yhteen.

Esilatausvastuksen resistanssi oli 22 ohmia.

$$U_r(t) = U_0 e^{-t/RC} \quad (16)$$

$$I_r(t) = U_0/R * e^{-t/RC} \quad (17)$$

$$P_r(t) = U_r(t)I_r(t) \quad (18)$$

Kaavat (16) ja (17) kuvaavat vastuksen jännitettä ja virtaa kytkemishetkellä. Kyseessä on RC-piiri, missä kytkin (ajanhetkellä $t=0$) sulkee akun, vastuksen ja kondensaattorin samaan piiriin. Kaavoissa U_0 tarkoittaa akun jännitettä. RC on piirin aikavakio sekunteina. [58]

Aikavakion kuluttua kytkimen sulkemisesta virta on pudonnut 37 %:iin maksimitaan. Laskukaavoilla esilatausvastuksen hetkelliseksi tehoksi saadaan 7,2 kW. Teho on hyvin lyhytaikainen, mutta niin suuri, että se poltti langan esilatausvastukselta.

Kaavasta (16) saadaan johdettua esilatautumiseen kuluva aika, minkä kuluessa jännite-erot ovat tasaantuneet akulla ja kondensaattoreilla:

$$t = -RC * \ln(U_r/U_0) \quad (19)$$

Laskettu esilatautumisaika 22 ohmin vastuksen kanssa on noin 18 ms. Vastus korvattiin 470 ohmin ja 500 W vastuksella. Tälle vastukselle laskettu hetkellinen teho

on luokkaa 340 W ja esilatausaika on arviolta 9 s.

Akunhallintajärjestelmän suojaustoiminnot olisivat kyenneet estämään kontaktoreiden rikkoutumisen. Esilatauspiirin suojaustoiminto ei ollut käytössä, mikä olisi havainnut puuttuvan esilatausvirran ja estänyt kontaktoreiden kytkeytymisen. Lisäksi selvisi, että HV-kortin esilatauspiirin suojausominaisuudet eivät kaikin osin toimineet.

Pienenkin virheen tai puutteen mahdollisuus havaittiin riittävän rikkoutumisen aiheuttajaksi. Ongelmaksi todettiin inhimillisen tekijän vaikutus. Tarkistettavien asioiden määrä kasvattaa riskiä virheen syntymiselle. Ratkaisuna luotiin akun käyttämisen lohkokaavio (Liitteessä B). Lohkokaavioon on pyritty ennalta miettimään kaikki käytön aikaiset tapahtumaskenaarit. Lohkokaavio tarjoaa oikean reaktointitavan kuhunkin tapahtumaan. Tarkasti noudattamalla lohkokaaviota riskit vahingoille ovat minimissään.

Korjaustoimenpiteiden jälkeen uusi kytkeytyminen onnistui, tosin usean mutkan kautta. Ensimmäiseksi kontaktoreiden kytkeytyminen keskeytyi vikatilaan. Vikatila ilmenee Lithiumaten havaitessa vuotovirran akun negatiivisen navan ja rungon välillä. Maadoitusjohdon kytkentä muutettiin oikeaoppiseksi.

Kytkeytymiset keskeytyivät toistuvasti virheeseen. Valmistajan mukaan ongelma on virran mittauksessa. ”Excessive precharge time” -parametri poistettiin käytöstä, mikä nostaa virheen esilatauksen mennessä yliajalle. Lithiumaten HV-kortin todettiin olevan päivityksen tarpeessa. Valmistaja lähetti uudempaa versiota olevan HV-kortin vanhan tilalle. Lopputyön aikana uudempi kortti ei ehtinyt saapua, joten siitä ei saatu kokemusta k.o. lopputyöhön.

Kolmantena asiana tehtiin purkulaitteiston kanssa havainto, että Elfa ei saa olla aktiivisena kytkemisvaiheen aikana. Välipiirin jännite ei tällöin kykene nousemaan kahta voltia korkeammaksi. Akku on kytkettävä piiriin ennen moottoriohjaimen aktivoimista. Vasta kytkeytymisen jälkeen moottoriohjain voidaan asettaa aktiiviseen tilaan. Näiden toimenpiteiden jälkeen kytkeminen moottoriohjaimeen onnistui. Esilatauspiiri rajoittaa virtaa 30 sekunnin ajan, kunnes varsinainen kontaktori kytkeytyy. Esilatauspiiri kykenee nostamaan välipiirin jännitteen n.30 voltin päähän akun jännitteestä. Jännite-ero johtuu moottoriohjaimen suurista vuotovirroista sekä esilatausvirran heikentymisestä jännite-eron pienetessä. Kytkemisen jälkeen havaittiin Elfan aktiivisessa tilassa epäsäännöllisesti toistuva ”bank communication fault”. Valmistajan mukaan vikatilaa aiheuttaa kadonnut yhteys kennomittauskorttiin tai sen lähettämä huonolaatuinen data.

Vian aiheuttajan syyksi arveltiin aluksi maasilmukoita tai suojaamattomia mitta-johtoja. Vikaa selvitettiin aluksi tarkistamalla kaikki kytkennät. Korjattiin puutteellinen maadoitus akkupaketin ja HV-kortin kanssa. Toiseksi poistettiin virransyöttö räkistä ja korvattiin se kelluvalla akulla, jotta virransyöttö ei aiheuta mahdolli-

sia maakytkentöjä. Toimenpiteiden havaittiin vähentävän virheen syntymistiheyttä. Seuraavaksi alettiin tutkia varsinaista kohdetta; kennomittakortti ja sen kytkentä käytiin läpi. Signaalikaapelin suojavaippa oli matkallansa mittakortilta Lithiumatelle maadoitettu akkumoduulin kuoreen. Oikeaoppisessa kytkennässä suojavaippa on kytketty maahan vain toisesta päästään, toisen pään vaipasta jääden avoimeksi. Nykyinen kytkentä on akkumoduulin kannessa olevan liittimen ehdoilla tehty: liitin on tyypiltänsä sellainen, että se ei estä suojavaippaa kytkeytymästä akkumoduulin kuoreen. Täydellistä korjausta tälle kytkennälle ei voida tehdä vaihtamatta liitintä. Korjaavana toimenpiteenä poistettiin jokaisen moduulin sisältä suojavaipan maadoitus. Näin uudessa kytkennässä suojavaippa ympäröi mittauskorttia akkumoduulin kuoren kautta, jättäen kuoren sisällä olevan signaalikaapelin suojaamatta.

Tämäkään toimenpide ei poistanut lopullisesti vikatilaa syntymistä. Havaintojen perusteella vian syntyminen on yhä harvinaisempaa. Vikatila ”bank communication fault” sekoittaa täysin resistanssin, SOC:n, DOD:n ja SOH:n arvot.

5.2.2 Akkupaketin validointitestit

5. Akun lataus ja esibalansointi

Ennen latausta kaikkien kennojen jännitteiksi mitattiin 3,70 V. Tulos todettiin sekä Can-väylä viesteistä että sarjaväylä pääte-emuloinnilla.

Akkupaketti ladattiin kuvan 17 mukaisella laitteistolla. Lataus keskeytettiin, kun ensimmäinen kenno saavutti 4,17 V jännitteen. Latausaika 1,3 A virralla oli 13,3 tuntia. Lithiumaten Can-väylään lähettämässä mittauksissa kennojännitteet nousevat portaittain 40 mV tai 70 mV välein. Jännitenousujen perusteella arvioitiin kennojen keskinäistä epätasapainoa. Yhden jännitetason nousemiseen kuluva keskimääräinen aika kaikilla kennoilla on kestoaltaan yhden tunnin luokkaa. Arvioitu epätasapaino kennojen välillä oli 1,3 Ah.

Esibalansointiin käytettiin aikaa kahdeksan ja puoli tuntia. Balansoinnin yhteydessä havaittiin akkukennojen jännitteiden aaltoilevan 70 mV amplitudilla ja aaltoilevan vielä pitkään latauksen katkaisun jälkeenkin. Balansoinnin loputtua aaltoilu oli enää 40 mV. Seuraavana päivänä jännitteet olivat tasoittuneet kaikki samalle tasolle.

Balansointilatauksen yhteydessä CCL- rajoitti latausta lineaarisesti suhteessa maksimikennojännitteeseen. Maltillinen 4,25 V ylilataus sallittiin. Balansointiparametrit oli asetettu niin että balansointialgoritmi salli 70 mV suuruisen kennojännitteiden aaltoilun. Balansointivastukset kytkeytyivät päälle kennojännitteiden ollessa 4,20 V tai enemmän. Lopputuloksena kaikkien kennojen jännitteet tasoittuivat 4,17 V:n.

Kuvan 18 laitteistolla ei toteutettu balansointitestejä. Laitteistolla akkupaketin lataaminen lopetettiin n.400 Voltin tason jälkeen. Täydemmäksi ladattaessa akku kytkettiin kuvan 17 laitteistoon Genesys-laturilla ladattavaksi.

6. Akun lataus ja purkaminen

Akkupaketti purettiin täydestä tyhjäksi ja ladattiin sitten takaisin täydeksi. Jännite oli alussa 409 V ja välittömästi purkamisen päätyminen jälkeen 322 V. Purkuvirta oli likimain 10–11 A kokoajan, kunnes vikatila pakotti hetkeksi keskeyttämään purkamisen. Tauon jälkeen purettiin 5 A:n virralla, kunnes pidettiin uusi tauko. Testi jatkui taas 5 A kuormalla. Purkaminen lopetettiin välittömästi paketin jännitteen laskiessa 317 V:n. Mitattu kapasiteetti oli 43,08 Ah.

Latausvirta oli portaittain kasvava aina 40 A:sti ja sitten portaittain laskeva. Latauksen lopussa latausta tauotettiin muutaman kerran latausvirran ollessa 2–4 A. Jännite oli alkuvaiheessa 330,7 V ja lähes välittömästi latauksen päätyttyä 408,7 V. Mitattu kapasiteetti oli 42,03 Ah.

7. Akun kuormitustestit ja estimointihavainnot

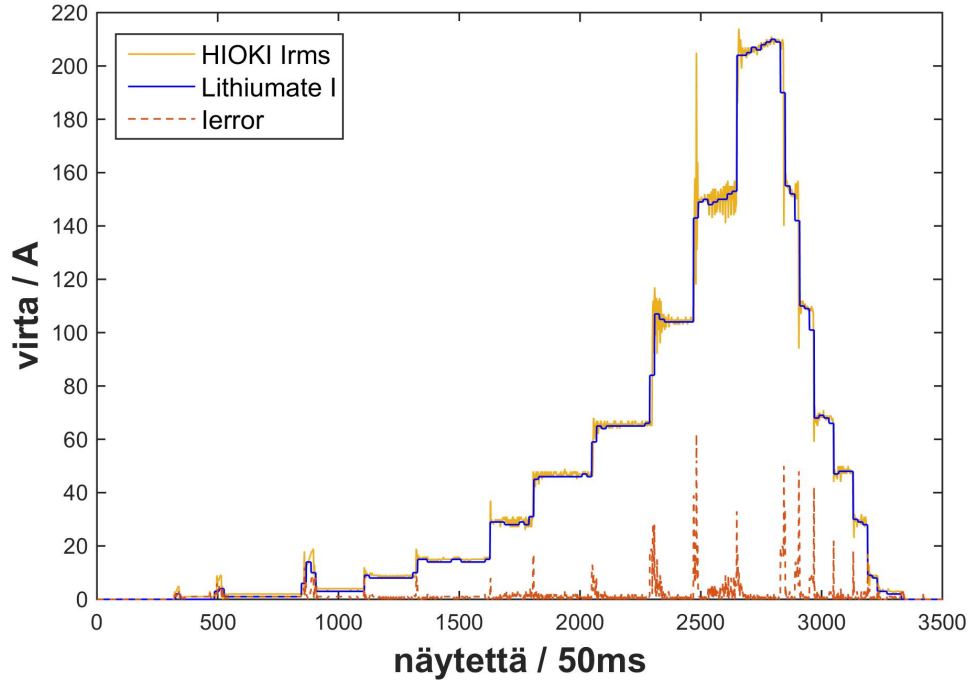
Testissä akkua kuormitettiin nousevilla virtaportailta: 1, 2, 4, 8, 15, 30, 46, 65, 105, 150, 205 A ja samat portaavat laskevasti.

Kuvassa 19 Hiokin ja Lithiumaten **virtamittaukset** kuvattuna. Mittausten välinen virhe on esitetty kuvassa. Lithiumaten virtamittaus tulee Can-väylältä yhden ampeerin resoluutiolla ja päivitetään yhden sekunnin välein. Spesifikaation mukaan Hiokin virheen osuus on korkeimmillaan $\pm 0,1$ A luokkaa ja Tamuran virhe on korkeimmillaan ± 2 A. Hiokin virtamittauksen skaalaus oli asetettu 200 A.

Jännite tarkasteluissa todettiin, että nykyinen Lithiumate versio ei tue HV-kortin jännitemittauksia. Akkupaketissa oleva versio on vuodelta 2008. Tuki HV-kortille tuli vuonna 2010 [35]. Akkupaketin jännite lasketaan näin ollen summana kennojännitteistä. Kokonaisjännitteen maksimivirhe on siis summa kunkin kennojännitemittauksen virheestä. Laskennallinen maksimi kokonaisjännitevirhe on näin $\pm 3,23$ V. Kokonaisjännitteen arvo päivitetään väylälle yhden voltin resoluutiolla sekä yhden sekunnin välein. Jännitteen todettiin pysyvän maksimivirheen sisäpuolella. Keskimääräinen virhe todetaan kaikissa kuormitustilanteissa pysyvän alle ampeerin kokoisena. Hetkellisesti virhe saattoi kasvaa yli ampeerin ja jopa yli maksimivirheen nopeissa virran muutostilanteissa. Hetkelliseksi maksimivirheeksi saatiin n.10 V. Keskiarvovirheeksi saatiin 0,47 V ja 0,1-prosenttia suhteelliseksi virheeksi Hioki mittaukseen verrattuna. Kennojännitteiden todettiin päivittyvän portaittain 30 tai 40 mV välein Can-väylälle.

8. Akun syklistestit

Akulle ajettiin kaivoslastaajan työkiertoa kuvaava sykli viisi kertaa toistettuna. Ajettu sykli oli 1:10 alkuperäisestä. Syklin maksimivirrat olivat 17 ja -11 A. Jännite vaihteli välillä 390–395 V.



Kuva 19: Vertailumittaus virta-anturin tarkkuudesta

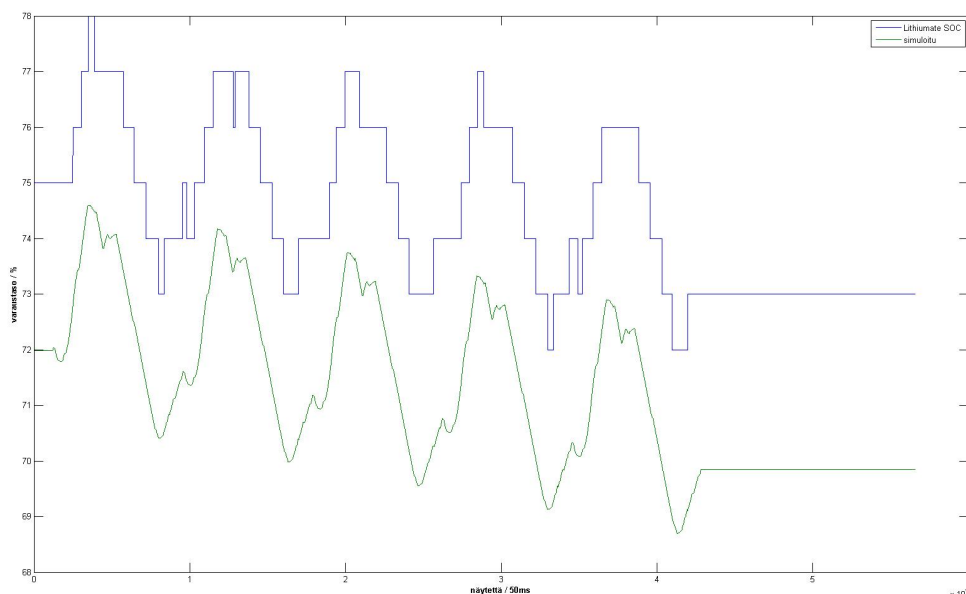
SOC-estimaatin arvoissa havaittiin kolmen prosentin poikkeama Hiokin mittauksista simuloituihin arvoihin verrattuna. Kuvassa (20) Hiokin virtamittausten pohjalta laskettu SOC (kuvassa: vihreä). Simulointiin käytetty kaava 20 on esitetty alempana.

$$SOC = \frac{C - E_{int}}{C} * 100 \quad (20)$$

C on akun kapasiteetti ja E_{int} akusta puretun energian virtaintegrointi.

DOD-estimaatin todettiin toisinaan noudattavan hyvin akun todellista purkusyvyyttä. Useissa mittauksissa havaittiin kuitenkin suuri poikkeama Lithiumaten estimaatin ja Hiokilla mitatun arvon lukemissa (Kuva (21)). Akun purkaminen 10 Ah verran täydestä tilasta aiheutti 3 Ah vajeen Lithiumaten laskemaan DOD:n. Syntynyt virhe luonnollisesti sekoittaa loput mittaukset. ”bank communication fault”-havaittiin nollaavan DOD:n arvon aiheuttaen pysyvän poikkeaman algoritmin laskemaan. Pysyvän poikkeaman havaittiin palautuvan lähelle normaalia arvoa akun purkamisen alku- ja loppupäissä.

SOH-estimaatti todettiin mittausten perusteella hyvin riippuvaiseksi resistanssilaskennan tarkkuudesta. Kennoresistanssien arvoissa tapahtuvan muutoksen havaittiin suoraan vaikuttavan SOH-estimaatin arvoon (Kuva (22)). Poikkeama resistanssin asetetun ja mitatun arvon välillä näkyy suoraan SOH-arvon alenemana. Mittausten aikana havaittiin SOH-arvon olevan 100-prosenttia tilanteissa, kun mitattu resistans-



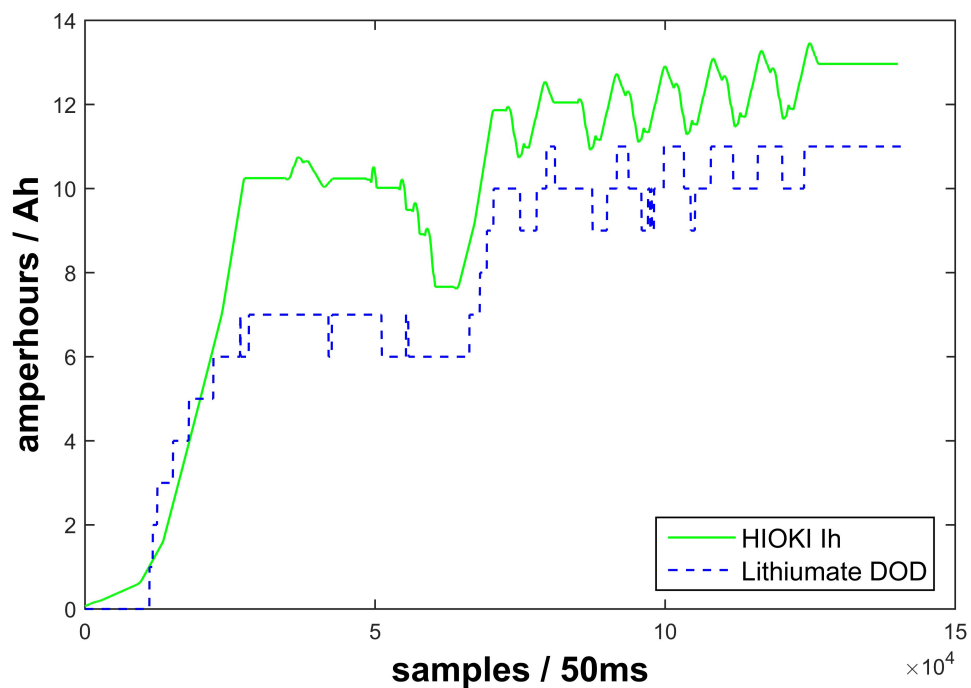
Kuva 20: Kuvaajassa on esitetty varaustilat: Lithiumate (sininen) ja Hioki (vihreä)

sin arvo on alle tai yhtä suuri kuin Lithiumateen asetettu resistanssin arvo. Mittausten aikana havaittiin resistanssilaskennan sekoamisen sekoittavan myös SOH-arvon.

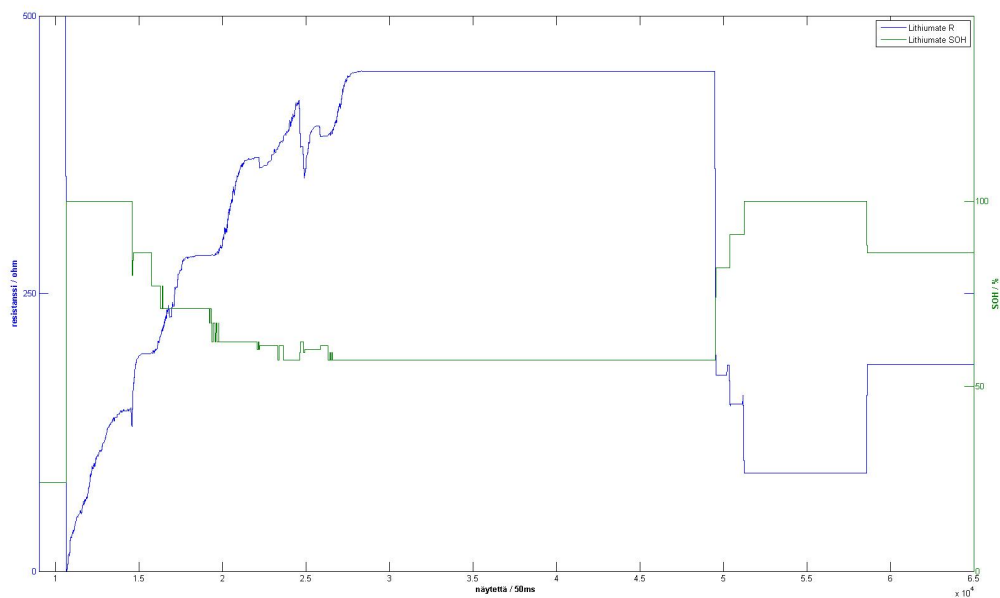
Resistanssin käyttäytymistä seurattiin akkupaketille tehtyjen mittausten aikana. Kennoresistanssien arvot ovat alkutilanteessa nollat. Virran ja jännitteen transienit aiheuttavat resistanssin arvoissa muutosta. Syklimitaukset osoittivat kennoresistanssien tasaantuvan arvoon 1.9 ja 2.0 m Ω kokonaisresistanssin ollessa 186.4 m Ω (Kuva (22)). Kokam ilmoittaa kennoillensa 2 - 4.5 m Ω resistanssin [57].

Resistanssin mittausta havaittiin hyvin herkäksi ”bank communication fault” - vikatilalle. Vian ilmeneminen aiheuttaa resistanssilaskennan täydellisen sekoamisen. Vian ilmetessä resistanssin arvo ponnahtaa ääriarvoonsa. Samalla sekoaa muutkin estimaatit: SOC, DOD ja SOH.

Testien aikana havaittiin akkukennojen **lämpötilan** jäähtyvän hitaasti. Toisaalta lämpötilan havaittiin kasvavan nopeasti yli 1 C virralla ja lämpötilan kasvun kiihtyvän virran kasvaessa. Mitatun lämpötilan havaittiin laskevan tuulettimien nopeuden kasvaessa.



Kuva 21: Lithiumate DOD ja Hiokin kumulatiivinen virta Ih



Kuva 22: sisäisen resistanssin vaihtelulla on suora vaikutus SOH-arvoon

6 Pohdinta

6.1 Käyttöönotto

Työssä toteutettiin kaksi testilaitteistoa sekä hyödynnettiin yhtä olemassa olevaa laitteistoa. Laitteistot saatiin työssä toimimaan halutulla tavalla. Niiden suunnittelu, rakentaminen ja testaus veivät oman aikansa. Latauslaitteiston (Kuva 17) aikaa vievin osuus oli sopivien kaapeleiden valmistaminen. Lataus- ja kuormituslaitteisto (Kuva 18) oli vaativin rakennettava reaalikäyttöympäristönsä vuoksi.

Työn edistymisen kannalta Lithiumaten ohjelmisto-päivitykset olivat tarpeellisia. Konfigurointi asetuksia muokattiin useampaan kertaan työn aikana. Esilataussuojasetuksien konfigurointi oli ongelmallista. Työn aikana kävi selväksi että HV-kortin version takia kaikkia esilatausominaisuuksia ei voitu käyttää. Uudemman version HV-kortti olisi syytä ottaa käyttöön turvallisen käytön kuin myös kaikkien ohjaimen ominaisuuksien hyödyntämisen vuoksi.

Useat käyttöönottamisen ongelmat konkretisoituivat juuri akun kytkeytyessä jännitevälipiiriin; puutteellisesti tehdyt kytkennät johtivat vikatiloihin. Lisäksi osa virheistä aiheutui esilatausasetuksista ja HV-kortin toiminnallisuudessa ilmenneistä puutteista.

Onnistuneen kytkemisen jälkeen akun ja akunhallintajärjestelmän havaittiin toimivan; akkupaketti kytkeytyy välipiiriin ja akkupakettia voidaan kuormittaa. Lisäksi akun tilaa voidaan seurata reaaliaikaisesti. Käyttöönottamisessa nähdään hyväksi noudattaa luvussa 4.2.1 esitettyä työjärjestystä. Akun käyttämistä opastava lohko-kaavio selkeyttää akun käyttöä.

”Bank communication fault” - jäi ratkaisemattomaksi vikatilaksi, vaikkakin sen esiintymistiheyttä kyettiin vähentämään. Vikatilan ilmeneminen sekoittaa Lithiumaten estimaatit. ”Bank communication fault”-vikatilan aiheuttaja olisi tärkeä saada kuntoon akun sujuvan jatkokäyttämisen kannalta. Tuloksissa tarkemmin kuvattu akku-moduulimittauskortin häiriösuojauskaapelointi jättää mahdollisuuden vian aiheuttajaksi.

Akkupakettiin oli testien aikana kytketty useita laitteita virransyöttöjohtojen, analogisten tai digitaalisten signaalijohtojen ja väylien kautta. Yksikin piilevä maadoitusongelma saattoi aiheuttaa paljon päänvaivaa akunhallintajärjestelmän vikatilojen selvittämisessä. Lisähaastetta toi laboratoriotilan voimakas sähkömagneettinen säteily.

6.2 Mittaukset

Balansoinnin aikana havaittu litiumkennojen jännitteiden oskillointi voidaan ymmärtää ilmenevän kahdesta syystä: ioniset resistanssi-ilmiöt ja mittausrésoluutio.

Litiumkennon ionisten resistanssien vaikutukset selittäisivät jännitteen muuttumista (Kaava 6). Toisaalta Elithion ilmoittaa jännitemittauksen resoluutioksi 7–33 mV. Pienimmillään Can-väylältä tulevat jännitemuutokset ovat 30 tai 40 mV. Jännitteiden aaltoilu voidaan ymmärtää 30–40 mV:n resoluutiolla havaittuna ionisten resistanssien aiheuttamina jännitetason muutoksina. Balansointivirran ja mahdollisen latausvirran yhteydessä havaittava suurempi 70 mV vaeltelu selittyy samana ilmiönä mutta voimakkaampana.

On positiivista että kaikki kennojännitteet havaittiin nimellisjännitteisiksi (3,7 V) työtä aloitettaessa. Kennot odottivat käyttöönottoa useamman kuukauden. Aina-kaan havaittavaa itsepurkautumista ei ollut tapahtunut.

Ensilataus ja balansointi toteutettiin kahdessa erässä. Lataamisen jälkeen testi keskeytettiin yön ajaksi. Aamulla testi jatkui balansoinnilla. Kennojen jännitteet olivat tasaantuneet yön aikana. Epätasapainon määrittämisen voisi tehdä toisellakin tapaa: määrittämällä aikaero siitä, kun ensimmäinen ja viimeinen kenno saavuttavat 4,17 V.

Balansointi todettiin luotettavaksi Genesys-laturilla ladattaessa. Lithiumate ohjaa latausta ja lataus keskeytyy CCL-lähdön ohjaamana. Lataus keskeytyy joko kokonaisjännitteen saavuttaessa 413 V tai yksittäisen kennon ylittäessä 4,25 V. Jännitteiden sallittujen huippuarvojen laskettiin olevan riittävän korkeat kompensoidakseen sisäisten resistanssien aiheuttamat jännitenousut. Latauksen loputtua balansointi jatkuu kunnes kaikki kennot ovat saavuttaneet balansointivälin 4,17–4,20 V. Menettelyllä on pyritty saavuttamaan nopein mahdollinen balansointiin kuluva aika.

Akun kapasiteetin mitatut arvot todettiin suuremmaksi kuin spesifikaatio lupaa. Lithiumaten parametrina oleva kapasiteetin arvo päivitettiin vastaamaan mitattujen arvojen keskiarvoa.

Akun kuormitustestit osoittivat akkupaketin normaalin toiminnan aina 200 A virralla (5 C).

Virran mittausta havaitaan silmämääräisesti tarkaksi. Virtamittausten keskinäinen virhe on suurimmillaan kuormituksen äkillisesti muuttuessa. Ilmiötä selittää nopeat muutokset virran tilassa. Lithiumaten mittaukset ovat suodatettuja ja ne päivitetään yhden sekunnin välein. Hiokin mittaukset päivittyvät 20 kertaa sekunnissa ja virran muutokset ovat paremmin havaittavissa Hiokin mittauksista. Virheen laskennassa on huomioitava että täydellistä mittauksen synkronointia ei voitu tehdä. Synkronoinnin ja suodatuksen takia varsinkin muutoskohdissa virheen arvoon jää epävarmuutta. Koko mittauksen yli lasketun virheen otoskeskiarvoksi saatiin 1 A. Silmämääräisen tarkastelun perusteella virhe porrasten tasaisissa kohdissa on 0,5 - 1 A luokkaa (Kuva 19).

Jännitemittaukset vastaavat spesifikaatiota. Kokonaisjännitettä ei pystytty mitta-

maan vaan se saadaan kennojännitteiden summana. HV-kortti, missä toimiva kokonaisjännitemittaus voisi vähentää koko paketin mittausvirhettä. Mittauksia voi hyödyntää estimaattien tarkkuuksia määritettäessä. Estimaatit pohjautuvat mittauksiin. Kun jännitemittauksen tarkkuus tunnetaan, voidaan estimaatin tarkkuutta arvioida.

Akkukennojen lämpötilojen todettiin kasvavan nopeasti ja jäähtyvän hitaasti. Lisäksi lämpötilan mitatun arvon havaittiin laskevan tuulettimen nopeuden kasvaessa. Ilmiötä selittää antureiden sijoitus. Anturit ovat kiinnitetty kennojen etuosaan ja näin ne altistuvat moduulin jäähdytysilmalle. Akkukennon todellinen lämpötila on kuitenkin korkeampi. Luotettavimpien lämpötilamittausten saamiseksi anturit olisi syytä sijoittaa uudelleen. Turvallisuutta parantavana toimenpiteenä Lithiumatena lämpötilan yläraja asetettiin 40-asteeseen. Työn aikana lämpötila-anturit ohjelmoitiin vastaamaan antureista tehtyä datalehteä. Lämpötilamittaus konfiguroidaan lämpötilan sovituskäyrän korjausvakiolla sekä korjauskertoimella. Konfiguraatiota muuttamalla lämpötilakäyrän muotoa on mahdollista muuttaa.

Lämpötilamittauksen osalta saman havainto tehtiin laboratoriossa akkukennoille tehdyissä lämpötilamittauksissa. Mittauksissa selvisi kennolämpötilan jakautuminen sekä kennojen keskinäinen lämpötilaero. Jäähtyminen todettiin hitaaksi, osin vähäisen lämmönsiirto pinta-alan vuoksi. Tutkimuksessa esitetään lämmönsiirtämisen parantamiseksi alumiinilevyjen käyttöä kennojen välissä, mistä lämpö johdetaan moduulin takaosaan. [56]

Akkupaketin kuormittaminen yli 2 C suuruisella virralla ei ole jatkuvassa käytössä mahdollista lämpötilan kasvun takia. Akun todellinen lämpötila olisi tärkeä tietää akkupaketin turvallisen käyttämisen kannalta.

Resistanssi-estimaatti todettiin spesifikaation mukaiseksi. Resistanssin estimaatti havaittiin herkäksi vikatiloille. Vikatila nollaa aina resistanssin arvon. Lithiumate on käytettävä virrattomana resistanssin arvon normalisoimiseksi. Virran katkaisu nollaa aikaisemmat resistanssin arvot ja laskenta alkaa tällä tavoin aina alusta. Arvon palautumiseksi tarvitaan transienttiviltoja.

Akunhallintajärjestelmässä ilmenneiden vikatilojen havaittiin häiritsevän estimaattien arvoja selvästi. SOC ja DOD palautuvat ennalleen pitkällisen käytön jälkeen ja ne tarvitsevat palautuakseen transienttitiloja. SOH:n laskenta perustuu resistanssiin, joten vasta resistanssin normalisoituminen palauttaa arvon normaaliksi.

Akunhallintajärjestelmän estimaattien tarkkuudet vaihtelevat: SOC ja DOD:ssa havaitaan pysyvää poikkeamaa. Saman mittauksen aikana havaitaan kummassakin estimaatissa 3 Ah:n pysyvä poikkeama. Pysyvän poikkeaman aiheuttaja voi olla poikkeama lähtöarvossa. Poikkeama voi olla myös vikatilan aiheuttama. Näissä tapauksissa akkupaketin täydeksi lataaminen kalibroisi estimaatit. Poikkeama voi johtua myös SOC-jännitekonfiguraatiosta: konfigurointitiedostoon asetetaan jännitelu-

kemaa vastaava SOC-arvo. Tiedoston arvojen poiketessa todellisista arvoista, poikkeamaa voi syntyä. Lisäksi poikkeama SOC-arvossa voi aiheutua virheellisestä DOD-arvosta.

Purkusyvyyden (DOD) estimaatin todettiin poikkeavan paljon Hiokin mittaamasta kumulatiivisesta virrasta (Ah).

SOH-estimaattia ei pystytty työssä kunnolla testaamaan. Estimoidun resistanssin ollessa suurempi kuin parametrina asetetun resistanssin, ero näkyy alentuneena SOH-estimaatin arvona. Resistanssiparametri kannattaakin asettaa sille sallitulle ylärajalle. Asettamalla resistanssin arvon terveen akun oletettuun ylärajaan tuottaisi luotettavampaa terveystila tietoa, jolloin resistanssi ei olisi niin herkkä muutoksille.

7 Johtopäätökset

Akkupaketin käyttöönottamiseksi luotiin ohjeistus, mikä on esitetty luvuissa 4.2.1 ja 4.2.2. Tehtyjen testien osalta todetaan akkupaketin soveltuvan ajoneuvokäyttöön, aikaisemmin mainituilla reunaehdoilla sekä puutteiden korjaamisen jälkeen. Käyttöönotto kartutti kokemusta ja tuloksia onkin hyvä hyödyntää samankaltaisissa projekteissa niin laitteiston kuin käyttöönottamisen suunnittelun merkeissä. Diplomityö palveli osaltaan tutkimusprojektia edistäen sen tavoitteita.

Akkupaketin HIL-testausta olisi hyvä jatkaa. Akkupaketille olisi hyvä tehdä 4.2.2 kuvatut testit mitä ei työssä ehditty tekemään. Tasavirtatestauksella selviäisi jatkuvan käytön vaikutukset akkupaketille. Dynaamisilla kuormitustesteillä selviäisi äärirajat sekä transsienttitilanteiden vaikutukset. Syklitestejä olisi hyvä tehdä isomilla virran arvoilla. Syklitestit osoittaisivat todellisen käyttämisen vaikutuksia akkupaketille. Laboratoriossa tehtävissä testeissä jää enemmän vapauksia muutosten tekemiseen. Lisäksi HIL-testauksen hinta ei ole niin suuri kuin aito testaus.

Akkuelektroniikka mahdollistaa mittausten tekemisen ja sitä kautta tila estimaattien laskennan. Tilainformaatio kyetään väylien ja signaalijohtojen kautta välittämään eteenpäin. Sulakkeilla suojataan akkua haitalliselta ylivirralla sekä releillä ja kontaktoreilla kyetään avaamaan ja sulkemaan virtapiiri. Tieto akun tilasta helpottaa akun käytön suunnittelua sekä parantaa sen hallintaa.

Akkupaketissa käytettävä akkukemia tulisi valita ajoneuvon käyttövaatimusten perusteella. Akuston ominaisuudet, kapasiteetti ja teho, tulisi mitoittaa vaatimusten perusteella. Lisäksi akkupaketin suunnittelussa tulisi huomioida ajoneuvon olosuhteet, erityisesti lämmönhallinnassa. Muita huomioitavia asioita ovat kiinnityspisteet, sähköliitännät, kaapelointi, huolto yms. Akunhallintajärjestelmän tulisi täyttää teoriakatsauksessa esitelty ominaisuudet sekä erityisesti toimia vakaasti.



Kuva 23: Akkupaketti on sijoitettuna Sandvik EJC90 - kaivoslastajaan

Viitteet

- [1] Wikipedia - Litium. Viitattu 28.12.2011. Saatavissa: <http://fi.wikipedia.org/wiki/Litium>
- [2] Wikipedia, Standardi elektrodi potentiaali - taulukko Viitattu 30.4.2012. Saatavissa: http://en.wikipedia.org/wiki/Table_of_standard_electrode_potentials
- [3] Martinet, S. *Tutorial 2.2 - Batteries for Electric and Hybrid Vehicles* Lille, IEEE, VPPC, 2010.
- [4] Goodenough, J. et. al. *Electrochemical cell with new fast ion conductors*. Patentti US 4,302,518, 31.3.1980. United Kingdom Atomic Energy Authority. Viitattu 2.5.2012. Saatavissa: <http://www.google.pl/patents/US4302518>
- [5] Ikeda, H. et. al. *Graphite/Li in nonaqueous solvents*. Patentti Japan 1769661, 18.6.1981. Sanyo. Viitattu 2012.
- [6] Basu, S. *Rechargeable battery*. Patentti US 4,304825, 8.12.1981. Bell Telephone Laboratories, Inc. Viitattu 2.5.2012. Saatavissa: <http://www.freepatentsonline.com/4304825.pdf>
- [7] Yoshino, A. *Li-Ion battery (battery based on carbonous material)*. Patentti Japan 1989293, 10.05.1985. Asahi Chemical Ind. Viitattu 2012.
- [8] Yoshio, M., Brodd, R. ja Kozawa, A. *Lithium-Ion Batteries*. New York, Springer, 2009.
- [9] Huggins, R. *Advanced Batteries*. New York, Springer, 2009.
- [10] Arora, A., Harris, J., Pinnangudi, B. *Lithium batteries for stationary applications: a safety perspective*. Phoenix, Battcon, 2011. http://www.battcon.com/PapersFinal2011/AroraPaperDONE2011_17.pdf
- [11] Whittingham, M. *Materials Challenges Facing Electrical Energy Storage* 2008, MRS tiedotuslehti. Binghamton University, USA. Viitattu 28.3.2015. Saatavissa: <https://www.mtixtl.com/documents/paper.pdf>
- [12] Claus, D. *Materials and Processing for Lithium-ion Batteries*. verkkolehti, 2008, syyskuu, nro 9. Viitattu 4.1.2012. Lehti ilmestyy myös painettuna. Saatavissa: <http://www.tms.org/pubs/journals/jom/0809/daniel-0809.html>
- [13] Martinet, S. *Tutorial - Batteries CEAv3-short - PartI* Lille, IEEE, VPPC, 2010. Viitattu 28.3.2015. Saatavissa: <http://vppc2010.univ-lille1.fr/uploads/PDF/VPPC-10-Pres-tutorial-batteries-Part-I%281%29.pdf>
- [14] Vuorilehto, K. *Kai Vuorilehdon akkuseelvitys FIMAlle, toinen versio, syyskuu 2010*.

- [15] Patterson, M. *Anode Materials for Lithium Ion Batteries* 2009, Indiana University Battery Workshop Viitattu 16.3.2015. Saatavissa: <http://nano.indiana.edu/documents/MPatterson.pdf>
- [16] Cluzel, C., Douglas, C. *Cost and performance of EV batteries* Element Energy Limited, Cambridge, 2012. Viitattu 28.3.2015. Saatavissa: http://www.element-energy.co.uk/wordpress/wp-content/uploads/2012/04/CCC-battery-cost_-Element-Energy-report_March2012_Public.pdf
- [17] Akkuvalmistajan kotisivut. *Altairnano* Viitattu 20.7.2012. Saatavissa: <http://www.altairnano.com/products/>
- [18] Akkuvalmistajan kotisivut. *Toshiba* Viitattu 20.7.2012. Saatavissa: http://www.toshiba.com/ind/product_display.jsp?id1=821
- [19] Spotnitz, R. *Advanced EV and HEV Batteries* Chicago, NREL, Battery Design LLC, 2005 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference.
- [20] Whittingham, M. *Lithium Batteries and Cathode Materials*. Chem. Rev. 2004, 104, 4271-4301. State University of New York, 2004. Viitattu 28.3.2015. Saatavissa: <http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/cr020731c>
- [21] Nylund, N-O. *Sähköautojen tulevaisuus Suomessa. Sähköautot liikenne- ja ilmastopolitiikan näkökulmasta*. Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisuja 12/2011. ISBN 978-952-243-221-6.
- [22] Scrosati, B., Garche, J. *Lithium batteries: Status, prospects and future* 2009, Journal of Power Sources 195 (2010) 2419-2430.
- [23] Internet sivusto: Manganese Investing News. *Manganese Battery Technology* 8.9.2013. Viitattu 28.3.2015. Saatavissa: <http://manganeseinvestingnews.com/1569/manganese-battery-technology/>
- [24] Battery University. *Types of Lithium-ion* Itseopiskelumateriaalia akkutekniikoista. Viitattu 1.4.2015. Saatavissa: http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion
- [25] Fergus, J. *Recent developments in cathode materials for lithium ion batteries* 2009, Journal of Power Sources. Viitattu 29.5.2012. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775309015304>
- [26] The Boston Consulting Group. *Batteries for Electric Cars - Challenges, Opportunities, and the Outlook to 2020* 2010. Viitattu 29.5.2012. Saatavissa: <http://www.bcg.com/documents/file36615.pdf>
- [27] Internet sivusto: hybridcars-Auto alternatives for the 21st century. *The Hybrid Car Battery: A Definitive Guide* 2008. Viitattu 1.6.2012. Saatavissa: <http://www.hybridcars.com/hybrid-car-battery>

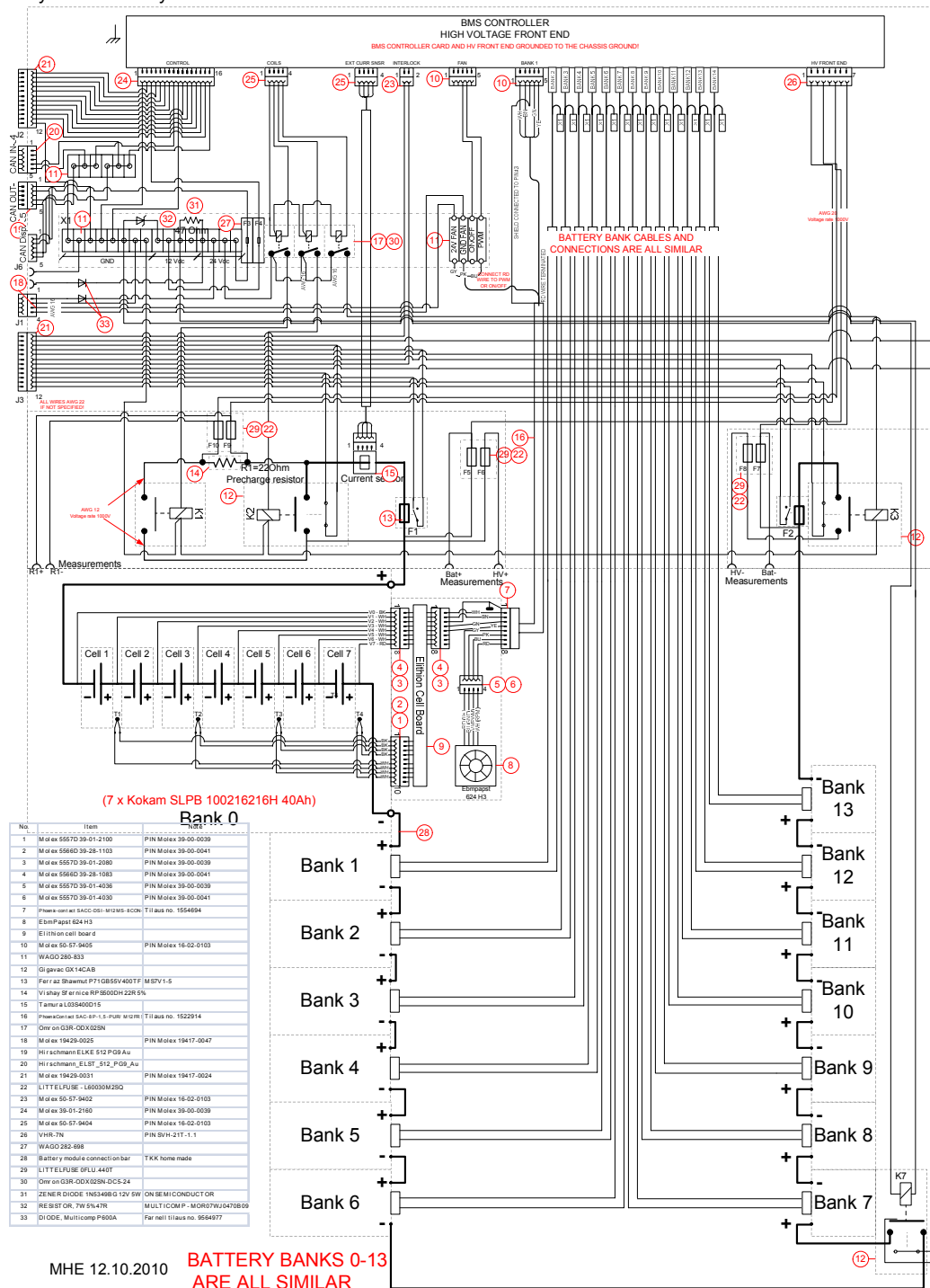
- [28] Lowe, M. et. al. *Lithium-ion Batteries for Electric Vehicles: THE U.S. VALUE CHAIN* 2010, Center on Globalization. Governance & Competitiveness Duke University Viitattu 24.7.2012. Saatavissa: http://unstats.un.org/unsd/trade/s_geneva2011/refdocs/RDs/Lithium-Ion\%20Batteries\%20\%28Gereffi\%20-\%20May\%202010\%29.pdf
- [29] Murray, M. *Meeting requirements for Li-ion in Electric Vehicles* 2011, 4. Low Emission Vehicle & Transport Conference Cambridge. Viitattu 24.7.2012. Saatavissa: <http://www.cir-strategy.com/uploads/Shift11MurrayMorgan.pdf>
- [30] Schweiger, H. et. al. *Glossary of battery and battery testing terminology for the usabc battery test procedures*. USABC Appendix F. http://www.uscar.org/commands/files_download.php?files_id=72
- [31] Schweiger, H. et. al. *Comparison of Several Methods for Determining the Internal Resistance of Lithium Ion Cells*. Berlin, Business Unit Hybrid and Electric Vehicles, 2010. ISSN 1424-8220. www.mdpi.com/1424-8220/10/6/5604/pdf
- [32] Nagasubramanian, G. *Impedance studies on Li-ion cathodes*. Albuquerque, Sandia National Laboratories, 2000. <http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/756067-7L9zgY/webviewable/756067.pdf>
- [33] Useat kehittävät keskustelut tutkija Ari Hentunen kanssa.
- [34] Pelissier, S. *Batteries for electric and hybrid vehicles* 2010, VPPC.
- [35] Davide, A. Elithion - Electronics for Lithium Ion. Viitattu 25.7.2011. Saatavissa: <http://elithion.com/>.
- [36] Hongwen, H. et. al. *Evaluation of Lithium-Ion Battery Equivalent Circuit Models for State of Charge Estimation by an Experimental Approach* 2011. Viitattu 31.7.2012. Saatavissa: www.mdpi.com/1996-1073/4/4/582/pdf
- [37] Martinet, S. *Tutorial 2.2 - Batteries for Electric and Hybrid Vehicles* Lille, IEEE, VPPC, 2010. Viitattu 28.3.2015. Saatavissa: <http://vppc2010.univ-lille1.fr/uploads/PDF/VPPC-10-Pres-tutorial-batteries-Part-I\%281\%29.pdf>
- [38] Valer, P. et. al. *Battery Management Systems - Accurate State-of-Charge Indication for Battery-Powered Applications* Philips Research Book Series Volume 9. Springer, 2008. ISBN 978-1-4020-6944-4
- [39] Winter, M., Brodd, R. *What Are Batteries, Fuel Cells, and Supercapacitors?* American Chemical Society, 2004. <http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/cr020730k>
- [40] Litium akkujen testistandardi. *UL 1642 Lithium Batteries*. ISBN 1-55989-829-1. <http://bbs.dianyuan.com/bbs/u/35/1131186328.pdf>

- [41] Litium-ion akkutekninen käsikirja. *Lithium Ion technical handbook*. Gold Peak Industries(Taiwan), Ltd. 2000. http://www.gpbatteries.com/html/pdf/Li-ion_handbook.pdf
- [42] Venugopal, G. *Characterization of thermal cut-off mechanisms in prismatic lithium-ion batteries*. Lawrenceville, Motorola, Energy Systems Group, 2001. Viitattu 28.3.2015. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775301007820>
- [43] Electropedia: Battery and Energy Technologies. Viitattu 25.4.2012. Saatavissa: <http://www.mpoweruk.com/soh.htm>
- [44] All About Circuits-verkkosivusto. *Practical considerations* Tietoa akkujen sarjaan ja rinnankytkennöistä. Viitattu 6.8.2012. Saatavissa: http://www.allaboutcircuits.com/vol_1/chpt_11/5.html
- [45] Cutler-Hammer *Improving Life of Parallel Connected Battery Strings* 2002, Eaton. Viitattu 6.8.2012. Saatavissa: <http://pps2.com/PDF/Balanced\%20DC\%20Battery\%20Charging.pdf>
- [46] Mills, A. Al-Hallaj, S. *Simulation of passive thermal management system for lithium-ion battery packs* 2004, Illinois Institute of Technology. Viitattu 6.4.2012. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775304010699>
- [47] Pesaran, P. *Battery Thermal Management in EVs and HEVs: Issues and Solutions* 2001, National Renewable Energy Laboratory. Viitattu 6.4.2012. Saatavissa: http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/energystorage/pdfs/aabc_lv.pdf
- [48] Dincer, I. *On thermal energy storage systems and applications in buildings* 2001, Saudi Arabia. Viitattu 6.4.2012. Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778801001268>
- [49] Matthew, Z. et. al. *Thermal Evaluation of Toyota Prius Battery Pack* 2002, National Renewable Energy Laboratory. Viitattu 7.8.2012. Saatavissa: http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/energystorage/pdfs/2a_2002_01_1962.pdf
- [50] MIT Electric Vehicle Team. *A Guide to Understanding Battery Specifications*. 2008. Viitattu 25.4.2012. Saatavissa: http://mit.edu/evt/summary_battery_specifications.pdf
- [51] Wikipedia, State of Health Viitattu 25.4.2012. Saatavissa: http://en.wikipedia.org/wiki/State_of_health
- [52] Electropedia: Battery and Energy Technologies. *Battery Communications Interfaces*. Viitattu 23.4.2012. Saatavissa: <http://www.mpoweruk.com/communications.htm>

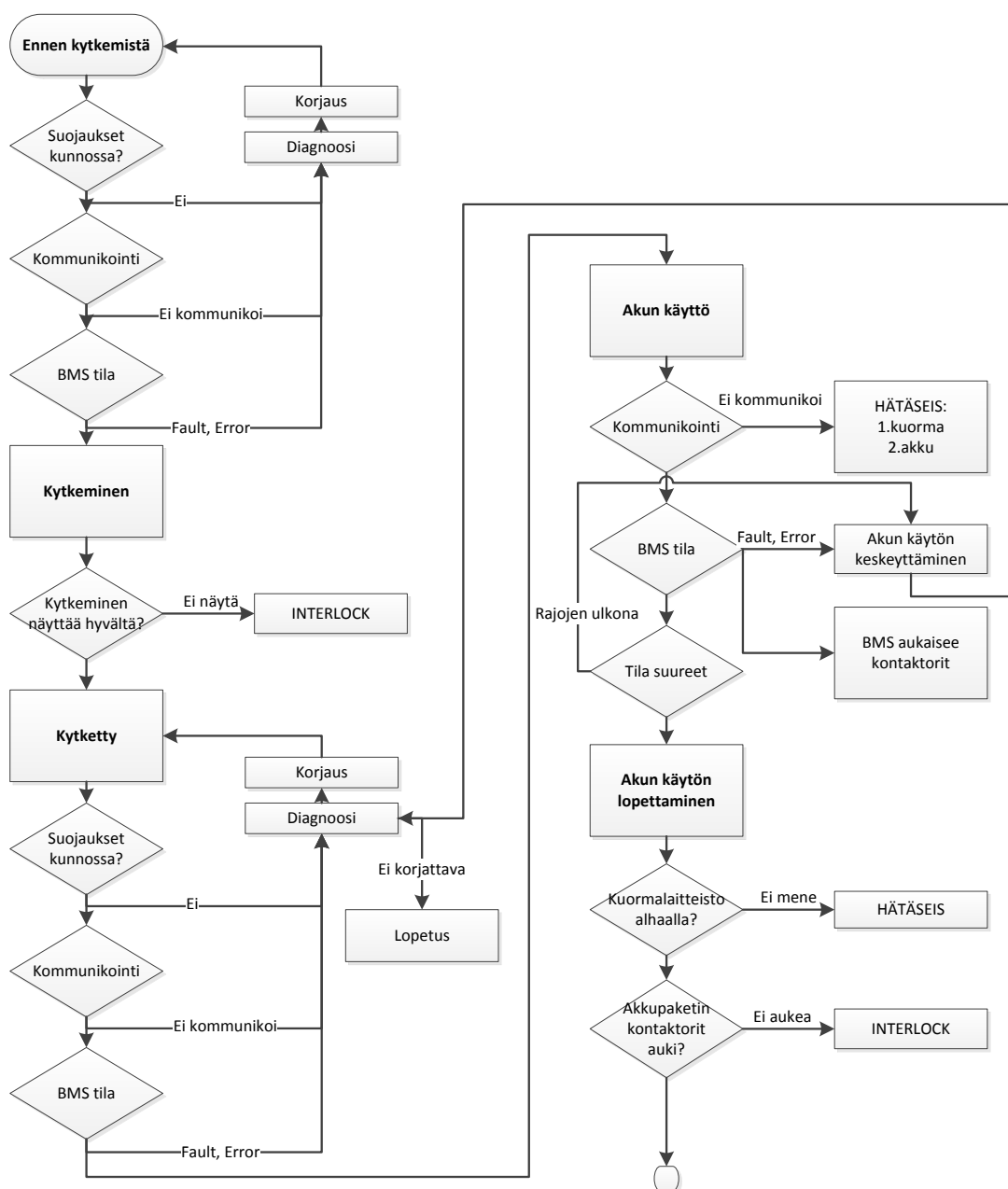
- [53] Autotekniikan laboratoriossa käytössä oleva Kokam Li-Ion kenno. *PL-202_SLPB100216216H_40Ah_Grade* Viitattu 7.8.2012. Saatavissa: <http://liionbms.com/pdf/kokam/>
- [54] Lehmuspelto, T. et. al. *Hybridization of a Mobile Work Machine* 2009, Helsinki University of Technology (TKK) Viitattu 28.3.2015. Saatavissa: <http://www.evs24.org/wevajournal/php/download.php?f=vol3/WEVJ3-5890520.pdf> World Electric Vehicle Journal Vol. 3 - ISSN 2032-6653 - 2009 AVERE
- [55] Hentunen, T. et. al. *Electrical Battery Model for Dynamic Simulations of Hybrid Electric Vehicles* 2011, Aalto University School of Electrical Engineering Viitattu 31.3.2015. Saatavissa: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6043164> 978-1-61284-247-9/11/ 2011 IEEE
- [56] Yasir, A. et. al. *Thermal Investigation of a Battery Module for Work Machines* 2011, Aalto University, School of Electrical Engineering. Viitattu 25.3.2015. Saatavissa: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5765758&tag=1 IEEE, ISBN: 978-1-4577-0107-8, DOI: 10.1109/ESIME.2011.5765758.
- [57] Kokam. *DOD-SOC IR pattern (80460330 3S1P) 61122 100Ah kenno*. Excel-tiedosto. Kokamin määrittämät DOD-SOC arvot työssä käytetyille Li-Ion polymeerikennoille.
- [58] Silvonen, K. *Sähkötekniikka ja elektroniikka*. Helsinki, Hakapaino Oy, 2003.
- [59] Li-ion akun rakennekuva. Nanotech Japan Bulletin. Viitattu 25.4.2012. Saatavissa: <https://nanonet.nims.go.jp/english/magazine/index.php?Vol.2042C20No.2062C202011-12-222FFocus2026-31>
- [60] Ramaraja, P. et. al. *Calendar life performance of pouch lithium-ion cells* 2004. Viitattu 2.8.2012. Saatavissa: http://www.che.sc.edu/faculty/popov/drbtnp/WebSite/Publications_PDFs/Web21.pdf

A Akkupaketin kytkentäkaavio

HybDrive Battery Pack

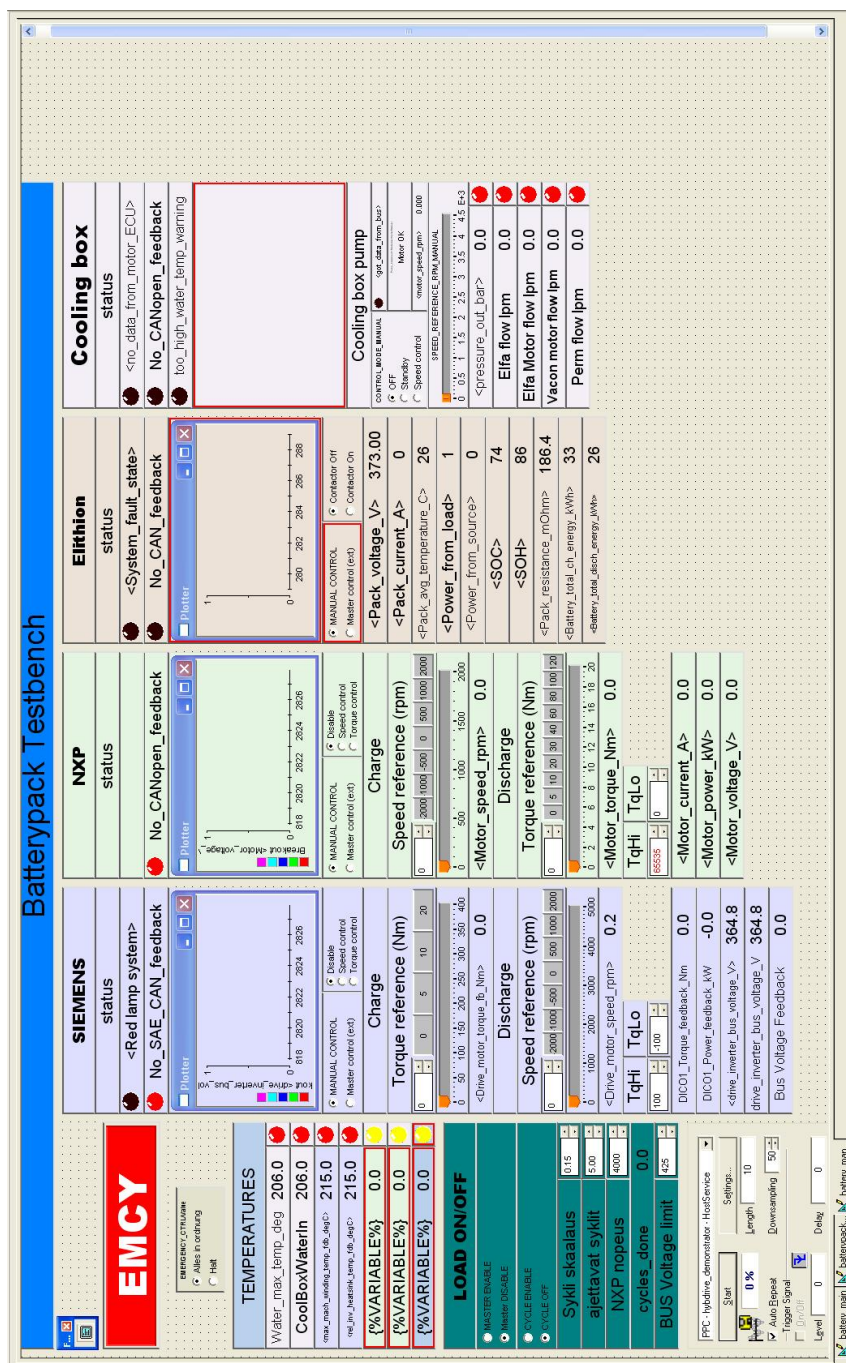


B Lohkokaavio akun käyttämisestä



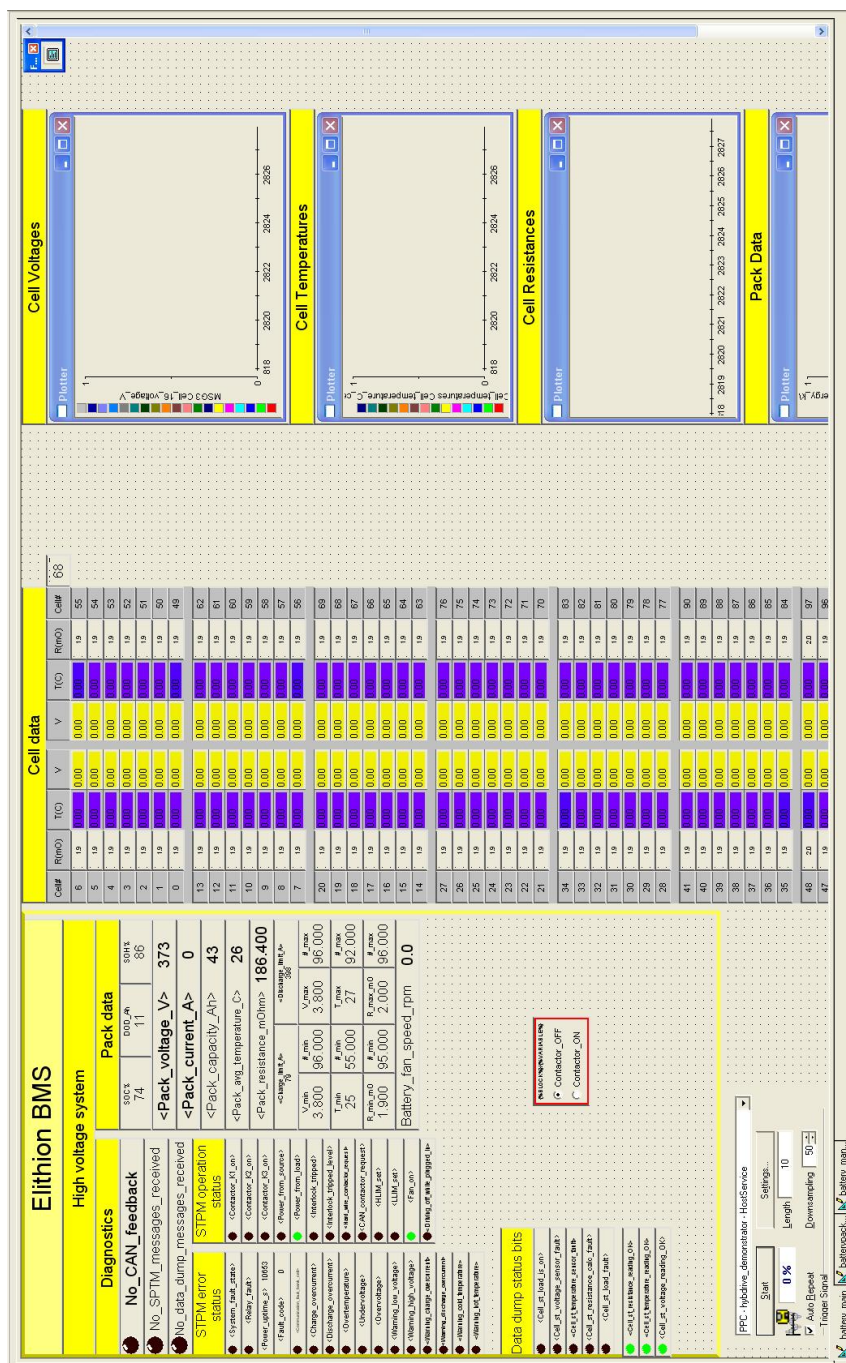
Kuva 24: Akkupaketin käyttämistä opastava lohkokaaavio

C Controldesk ohjausnäköymä



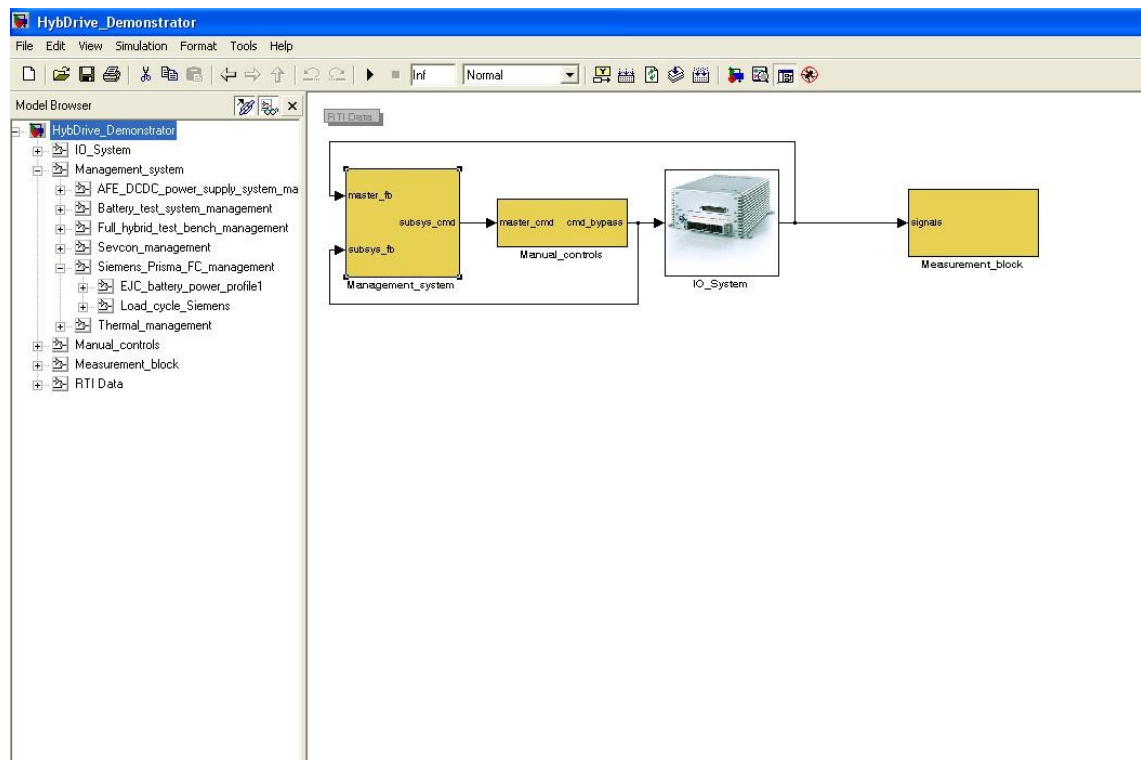
Kuva 25: Akkupaketin purku- ja latauslaitteiston ohjaus

D Controldesk mittausnäky



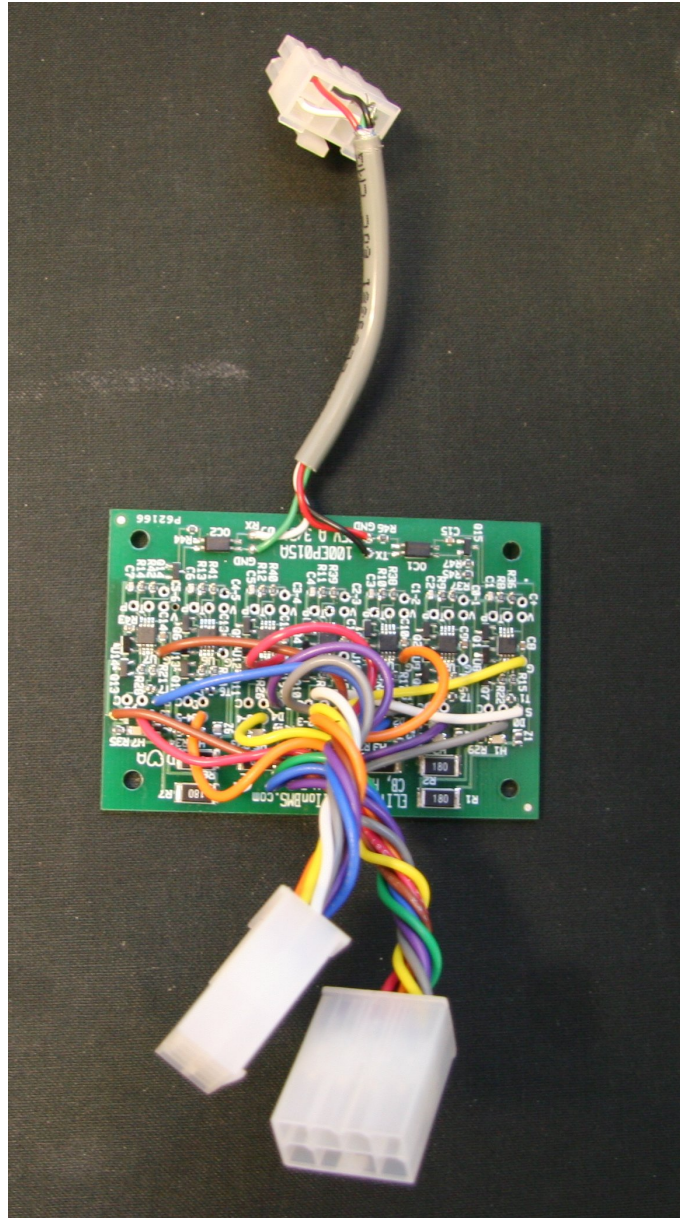
Kuva 26: Akkupaketin mittaus

E Simulink rakenne



Kuva 27: Akkupaketin simulink-pohjainen mittaus ja testiohjauslogiikka

F Akkumoduulin balansointikortti



Kuva 28: Balansointikortti on räätälöity yliopiston akkumoduulille